

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

Основан в 1968 г.

Свидетельство  
о государственной  
регистрации  
КВ № 9148 от 10.09.2004

ISSN 0555-2656

Журнал включен в список  
специальных изданий  
ВАК Украины  
по техническим наукам  
(Приложение  
к постановлению  
ВАК Украины № 1-05/7  
от 04.07.2006)

# БИОНИКА ИНТЕЛЛЕКТА

ИНФОРМАЦИЯ, ЯЗЫК, ИНТЕЛЛЕКТ

№ 2 (65)

2006

**Гл. редактор** М. Ф. Бондаренко, д-р техн. наук, профессор,  
заслуженный деятель науки и техники Украины,  
академик Академии высшей школы

**Редакционная коллегия:** Ю. П. Шабанов-Кушнарченко (отв. редактор),  
д-р техн. наук, профессор  
Г. Г. Четвериков (зам. отв. редактора),  
д-р техн. наук, профессор  
Р. П. Базилевич, д-р физ.-мат. наук, профессор  
Е. В. Бодянский, д-р техн. наук, профессор  
А. И. Бых, д-р физ.-мат. наук, профессор  
Т. К. Винцюк, д-р техн. наук, профессор  
З. В. Дударь, канд. техн. наук, профессор  
Н. С. Лесная, канд. техн. наук, профессор  
В. П. Машталир, д-р техн. наук, профессор  
А. Г. Нерух, д-р физ.-мат. наук, профессор  
А. В. Палагин, акад. НАНУ, д-р техн. наук, профессор  
Е. П. Путятин, д-р техн. наук, профессор  
О. Г. Руденко, д-р техн. наук, профессор  
А. Г. Руткас, д-р физ.-мат. наук, профессор  
И. Б. Сироджа, д-р техн. наук, профессор  
С. В. Смеляков, д-р физ.-мат. наук, профессор  
А. Д. Тевяшев, д-р техн. наук, профессор  
С. Ю. Шабанов-Кушнарченко, д-р техн. наук, профессор  
В. А. Широков, чл.-корр. НАНУ,  
д-р техн. наук, профессор



© Харьковский национальный университет радиоэлектроники, 2006  
© ООО «Компания СМИТ», 2006

# БИОНИКА ИНТЕЛЛЕКТА

## ИНФОРМАЦИЯ, ЯЗЫК, ИНТЕЛЛЕКТ

№ 2 (65)

2006

### СОДЕРЖАНИЕ

<i>Бескоровайный В. В., Петров Э. Г., Трофименко И. В.</i> Метод решения общей задачи компараторной идентификации моделей многофакторного оценивания . . . . .	3
<i>Руденко О. Г., Островерхий А. В., Островерхая Н. Н.</i> Аппроксимация многомерных функций с помощью нейронной сети СМАС . . . . .	8
<i>Ефимова И. А., Лецинский В. А., Токарев В. В., Четвериков Г. Г.</i> Синтез бинарных логических сетей и особенности их функционирования . . . . .	14
<i>Ерохин А. Л.</i> О визуальном кодировании информации на основе идентификации когнитивных функций человека-оператора. Сообщение 1 . . . . .	19
<i>Бобух В. А., Павлова Н. В.</i> Реализация некоторых колориметрических преобразований изображений в реальном времени . . . . .	27
<i>Вечирская И. Д.</i> О решении обратной задачи для линейных логических преобразований . . . . .	36
<i>Гребенник И. В., Хабаров А. Ю.</i> Математическая модель задачи планирования работ в системе поддержки принятия решений. . . . .	40
<i>Герасин С. Н., Шляхов В. В.</i> Аксиоматическое введение метрики в субъективных пространствах . . . . .	44
<i>Бритик В. И., Байдикова Е. А.</i> Алгоритм обучения идентификации многомерных объектов . . . . .	49
<i>Танянский С. С.</i> Технология построения крупномасштабной базы данных. . . . .	53
<i>Шамша Б. В., Шатовська Т. Б., Халецький В. М.</i> Прийняття рішень щодо якості успішності студентів на основі методів розпізнавання образів . . . . .	57
<i>Новосельцев И. В., Аксак Н. Г., Барковская О. Ю.</i> Вероятностные нейронные сети для решения задач медицинской диагностики . . . . .	62
<i>Цимбал О. М.</i> Подання знань у системах прийняття рішень інтелектуальних роботів . . . . .	66
<i>Нестеренко О. А., Глубокая Е. Ю., Лепеха О. Н.</i> Модели, методы и средства классификационного моделирования многокритериальных задач принятия решений . . . . .	71
<i>Манако А. Ф.</i> Каркас побудови МАНОК-систем. . . . .	77
<i>Шамраева Е. О., Аврунин О. Г.</i> Выбор метода сегментации костных структур на томографических изображениях . . . . .	83
<i>Федоров Е. Е.</i> Метод определения границ изолированного слова в речевом сигнале . . . . .	88
<i>Герасин С. Н., Гибкина Н. В., Ружицкий А. В.</i> Методы параметрической идентификации неоднородных моделей фармакодинамики . . . . .	92
Рефераты. . . . .	97
Сведения об авторах . . . . .	105
Правила оформления рукописів для авторів науково-технічного журналу «Біоніка інтелекту» . . . . .	106

УДК 519.81

В. В. Бескоровайный, Э. Г. Петров, Н. В. Трофименко

## МЕТОД РЕШЕНИЯ ОБЩЕЙ ЗАДАЧИ КОМПАРАТОРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ МНОГОФАКТОРНОГО ОЦЕНИВАНИЯ

### 1. Введение

Одной из важнейших задач бионики интеллекта является изучение процессов многофакторного оценивания и выбора решений человеком. Формализация и моделирование этих процессов позволят совершенствовать существующие и создавать новые системы поддержки принятия решений (СППР). Это, в свою очередь, будет способствовать повышению качества принимаемых решений в системах управления и автоматизированного проектирования антропогенных объектов.

В настоящее время в основе моделей принятия решений лежит парадигма максимизации полезности [1–2]. Считается, что лицо, принимающее решение (ЛПР), при выборе вариантов из множества допустимых  $x \in X$  приписывает им некоторую полезность (ценность)  $P(x)$ , количественные значения которой и определяют его выбор  $x^0 \in X$ :  $\forall x, y \in X: x \sim y \leftrightarrow P(x) = P(y); x \succ y \leftrightarrow P(x) > P(y); x \succeq y \leftrightarrow P(x) \geq P(y), x^0 = \arg \max_{x \in X} P(x)$ . Качественные

предпочтения ЛПР на множестве альтернатив  $X = \{x\}$  задаются с помощью множества бинарных отношений эквивалентности  $R_E(X) = \{(x, y): x, y \in X, x \sim y\}$ , нестрогого предпочтения  $R_{NS}(X) = \{(x, y): x, y \in X, x \succeq y\}$ , строгого предпочтения  $R_S(X) = \{(x, y): x, y \in X, x \succ y\}$  и представляются порядком одного из видов

$$R^0(X) = x^0 \succ x_1 \succ x_2 \succ \dots \succ x_n, \quad (1)$$

$$R^0(X) = x^0 \sim x_1 \sim x_2 \sim \dots \sim x_n, \quad (2)$$

$$R^0(X) = x^0 \succeq x_1 \succeq x_2 \succeq \dots \succeq x_n. \quad (3)$$

Другие виды порядков могут быть сведены к порядкам (1)–(3). Так часто встречающийся случай выбора ЛПР единственного варианта  $x^0 \succ x_i, \forall x_i \in X, x_i \neq x^0$  может быть представлен совокупностью порядков (1). Другим удовлетворительным вариантом описания такой ситуации является  $R^0(X) = x^0 \succ x_1 \succ x_2 \succ \dots \succ x_n$ , что может рассматриваться как частный случай порядка (2).

Для количественной оценки предпочтений ЛПР требуется определение метрики в виде функции обобщенной полезности (ФОП)  $P(x)$ , позволяющей ранжировать альтернативы  $x \in X$ , формируя порядок вида (1), (2) или (3). ФОП формируются на основе функций полезности частных критериев (ФПЧК)  $\xi_i(k_i(x)), i = 1, m$  (где  $m$  — количество частных критериев  $k_i(x)$ ). Синтез ФОП сводится к решению множества задач структурной и параметрической идентификации. В общем случае в процессе иденти-

фикации требуется решение вопросов, связанных с выбором критериев подобия, входных сигналов, структуры и параметров модели, оценки ее точности и адекватности [3]. Наибольший интерес, как в теоретическом, так и в практическом плане представляют вопросы выбора структуры и параметров (коэффициентов функций полезности частных критериев, их весовых и адаптационных коэффициентов) моделей оценивания  $P(x)$  [4–5].

### 2. Анализ современных исследований и публикаций

Модели многофакторного оценивания и выбора решений строятся на основе аддитивных, мультипликативных или смешанных ФОП следующих видов [4–10]:

$$P_A(x, q_M) = \sum_{i=1}^m \lambda_i \xi_i(x); \quad (4)$$

$$P_M(x, q_M) = \prod_{i=1}^m [\xi_i(x)]^{\lambda_i}; \quad (5)$$

$$P_{S_1}(x, q_M) = \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \bar{k}_i(x) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m \lambda_{ij} \cdot \bar{k}_i(x) \cdot \bar{k}_j(x) + \dots; \quad (6)$$

$$P_{S_2}(x) = [\beta \cdot \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \bar{k}_i(x)] + \{(1-\beta) \cdot \prod_{i=1}^m [\bar{k}_i(x)]^{\lambda_i}\}, \quad (7)$$

где  $\lambda_i$  — коэффициент важности критерия  $k_i$ , выбираемый с учетом условий  $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1, \lambda_i \geq 0; i = 1, m$ ;

$\xi_i(x) \equiv \xi_i(k_i(x))$  — ФПЧК критерия  $k_i$ ;  $\lambda_{ij}$  — весовые коэффициенты произведения нормированных критериев  $\bar{k}_i \cdot \bar{k}_j, i, j = 1, m$ ;  $\beta$  — адаптационный коэффициент, определяющий вид схемы.  $0 \leq \beta \leq 1$ . При  $\beta = 1$  модель (7) реализует аддитивную схему (4), при  $\beta = 0$  — мультипликативную схему вида (5).

Простейшими ФПЧК являются функции нормирования  $\bar{k}_i(x)$ , которое может быть произведено, например, по схеме  $\bar{k}_i(x) = [k_i(x) - k_i^-] / [k_i^+ - k_i^-]$ , где  $k_i(x)$  — значение  $i$ -го частного критерия для варианта  $x$ ;  $k_i^-, k_i^+$  — наихудшее и наилучшее значения критерия  $k_i$ . При наличии дополнительной информации о ценности свойств альтернативы вместо нормированных значений  $\bar{k}_i(x)$  используются более сложные ФПЧК, реализующие отображения  $\xi_i: k_i(x) \rightarrow E^1$ . Они должны быть универсальными и хорошо приспособленными для учета особенностей конкретных ситуаций принятия решений: быть монотонными и безразмерными; иметь единый интервал изменения (например, от 0 до 1); быть инвариантными к виду экстремума частного критерия;

позволять реализовать как линейные, так и нелинейные зависимости от значений критерия  $k_i(x)$ . Перечисленным требованиям соответствует, в частности, ФПЧК вида [2]

$$\xi_i(x) = \xi_i(k_i(x)) = [\bar{k}_i(x)]^{\alpha_i} = \left( \frac{k_i(x) - k_i^-}{k_i^+ - k_i^-} \right)^{\alpha_i}, \quad (8)$$

где  $\alpha_i$  — коэффициент, определяющий вид зависимости. При  $\alpha_i = 1$  реализуется линейная, при  $0 < \alpha_i < 1$  — выпуклая, а при  $\alpha_i > 1$  — вогнутая зависимость.

Для реализации более сложных зависимостей предложена универсальная ФПЧК, позволяющая реализовать линейные, выпуклые, вогнутые и комбинированные (выпукло-вогнутые, вогнуто-выпуклые) зависимости [11]:

$$\xi_i(\bar{k}_i(x)) = \begin{cases} a_i \cdot \left( \frac{\bar{k}_i(x)}{\bar{k}_{ia}} \right)^{\alpha_{i1}}, & 0 \leq \bar{k}_i(x) \leq \bar{k}_{ia}, \\ a_i + (1 - a_i) \cdot \left( \frac{\bar{k}_i(x) - \bar{k}_{ia}}{1 - \bar{k}_{ia}} \right)^{\alpha_{i2}}, & \bar{k}_{ia} < \bar{k}_i(x) \leq 1, \end{cases} \quad (9)$$

где  $\bar{k}_{ia}$  — нормированное значение координаты  $k_{ia}$  точки перегиба функции;  $k_{ia}$ ,  $a_i$  — значения координат точки перегиба функции,  $0 \leq a_i \leq 1$ ,  $\alpha_{i1}$ ,  $\alpha_{i2}$  — коэффициенты, определяющие вид зависимости (линейная, выпуклая, вогнутая) соответственно на начальном и конечном отрезках.

При использовании градиентных методов для обеспечения дифференцируемости функции (9) может выполняться ее склейка с помощью кубического сплайна [11].

Вектор параметров  $q_M$  для каждого из видов моделей  $P_\delta(x, q_M)$ ,  $\delta \in \Delta$  в общем случае, состоит из трех векторов  $q_M = [q_\Xi, q_\Lambda, q_B]$ , где  $\Delta$  — множество допустимых видов моделей, включающее, например, модели (4)–(7):  $q_\Xi$  — вектор параметров ФПЧК;  $q_\Lambda$  — вектор весовых коэффициентов частных критериев;  $q_B$  — вектор адаптационных параметров ФОП. Размерность и состав векторов  $q_\Xi$ ,  $q_\Lambda$  и  $q_B$  определяются выбранными видами ФПЧК  $\xi_i(x)$  и ФОП  $P_\delta(x, q_M)$ .

Вектор-функции  $\Xi(x) = [\xi_i(x)]_{i=1}^m$ , построенные на основе ФПЧК вида (8), задаются вектором параметров  $q_\Xi = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m]$ , а на основе ФПЧК вида (9) —  $q_\Xi = [q_{\Xi 1}, q_{\Xi 2}, \dots, q_{\Xi m}]$ , где  $q_{\Xi i} = [\bar{k}_{ia}, a_i, \alpha_{i1}, \alpha_{i2}]$ . Вектор  $q_\Lambda$  для каждого из видов ФОП задается значениями весовых коэффициентов частных критериев, т. е.  $q_\Lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m]$ . Элементами вектора  $q_B$  могут быть адаптационные параметры моделей: аддитивно-мультипликативной (7); для условий неопределенности целей и (или) данных [2, 8].

Сложность задачи идентификации моделей многофакторного оценивания  $P_\delta(x, q_M)$ ,  $x \in X$ , требует ее декомпозиции на комплекс задач: структурной

(выбор вида модели  $\delta \in \Delta$ ), параметрической идентификации ФПЧК (определения  $q_M = q_\Xi = [\alpha_i]_{i=1}^m$  или  $q_M = q_\Xi = [q_{\Xi i}]_{i=1}^m$ ) и ФОП (определения вектора весовых коэффициентов частных критериев  $q_M = q_\Lambda = [\lambda_i]_{i=1}^m$  и адаптационных параметров  $q_M = q_B = [\beta_i]_{i=1}^m$ ).

Особенностью процессов идентификации моделей многофакторного оценивания и выбора решений является то, что в качестве выходных сигналов в таких задачах выступают оценки и решения ЛПР или эксперта, имеющие качественный или весьма приближенный характер [2]. Традиционно перечисленные задачи решались независимо, как правило, экспертным путем. Для определения вектора весовых коэффициентов  $q_\Lambda$  используются методы ранжирования, парных сравнений, множественных сравнений, непосредственной оценки, Черчмена—Акоффа, Терстоуна, Неймана—Моргенштерна, анализа иерархий [8].

В качестве альтернативы экспертному оцениванию в настоящее время все чаще используется технология компараторной идентификации [2, 4–7].

Существующие методы компараторной идентификации для известной структуры модели многофакторного оценивания  $P(x, q_M)$  (где  $x \in X$  — альтернатива из множества допустимых;  $q_M = [q_\Xi, q_\Lambda, q_B]$  — вектор параметров модели) строятся на основе следующей схемы (рис. 1).

Эксперту или ЛПР предъявляется пара альтернатив  $u, v \in X$ . Они характеризуются множеством частных критериев  $K = \{k_j(x)\}_{j=1}^m$ . Значения характеристик предложенных альтернатив  $K(u)$  и  $K(v)$  формируют в сознании ЛПР представление (неизмеряемые оценки) об их относительной ценности  $y = \varphi[K(u)]$  и  $z = \varphi[K(v)]$ . На основании субъективных представлений о ценностях  $y = \varphi[K(u)]$ ,  $z = \varphi[K(v)]$  пары альтернатив  $u, v \in X$  ЛПР относит ее к одному из бинарных отношений: эквивалентности  $R_E(X)$ , предпочтения  $R_S(X)$  или нестрогого предпочтения  $R_{NS}(X)$ .

Формально процесс такого анализа может быть представлен системой компараторов, реализующих соответственно предикаты вида

$$D_1(y, z) = \begin{cases} 1, & \text{если } y \sim z, \\ 0, & \text{если } y > z \text{ или } y < z; \end{cases} \quad (10)$$

$$D_2(y, z) = \begin{cases} 1, & \text{если } y > z, \\ 0, & \text{если } y < z; \end{cases} \quad (11)$$

$$D_3(y, z) = \begin{cases} 1, & \text{если } y > z, \\ 0, & \text{если } y < z \text{ или } y \sim z. \end{cases} \quad (12)$$

На основе сформированных компараторами (10)–(12) бинарных отношений эквивалентности  $R_E(X)$ , нестрогого  $R_{NS}(X)$  или строгого предпочтения  $R_S(X)$ , с учетом вида используемой функции общей

полезности (8)–(9) могут быть сформированы системы уравнений и (или) неравенств (СУН) следующих видов:

$$P(u, q_M) = P(v, q_M), u, v \in R_E(X); \quad (13)$$

$$P(u, q_M) \geq P(v, q_M), u, v \in R_{NS}(X); \quad (14)$$

$$P(u, q_M) > P(v, q_M), u, v \in R_S(X). \quad (15)$$

Полученные системы уравнений и неравенств дополняются ограничениями на значения параметров  $q_M \in Q_M$  для весовых коэффициентов частных критериев  $q_\Lambda \in Q_\Lambda$ :

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1, \lambda_i \geq 0, \forall i = 1, m. \quad (16)$$

В общем случае, при непротиворечивости выбора ЛПР полученные расширенные СУН (13)–(16) могут иметь бесчисленное множество решений. Для получения единственного решения требуется их регуляризация.

В рамках этого подхода, в предположении, что известны параметры ФПЧК, разработаны математические модели и методы идентификации весовых коэффициентов отдельно для аддитивных моделей вида (1) [7], мультипликативных моделей вида (2) [6], для аддитивно-мультипликативных моделей на основе полноты Колмогорова–Габор [9]. Такой подход снижает адекватность получаемых моделей. Для повышения точности и адекватности моделей многофакторного оценивания целесообразным является совместное решение задач определения параметров ФПЧК ( $q_\Xi = [\alpha_i]_{i=1}^m$  или  $q_\Xi = [k_{ia}, a_i, \alpha_{1i}, \alpha_{2i}]_{i=1}^m$ ), весовых коэффициентов частных критериев  $q_\Lambda = [\lambda_i]_{i=1}^m$  и адаптационных параметров  $q_B = [\beta_i]_{i=1}^{n\beta}$  на допустимом множестве моделей-претендентов  $\Delta = \{\delta\}$ .

Целью исследований является разработка метода решения общей задачи структурно-параметрической компараторной идентификации моделей многофактор-

ного оценивания  $P(x, q_M), x \in X, q_M = [q_\Xi, q_\Lambda, q_B]$ , предполагающей совместное определение параметров ФПЧК  $q_\Xi$ , весовых коэффициентов частных критериев  $q_\Lambda$  и адаптационных параметров  $q_B = [\beta_i]_{i=1}^{n\beta}$  для заданного множества моделей-претендентов  $\Delta = \{\delta\}$ .

Суть общей задачи идентификации модели многофакторного оценивания состоит в следующем. ЛПР на основе оценок по множеству частных критериев  $\{k_i(x)\}_{i=1}^m$  устанавливает качественную полезность на множестве альтернатив  $x \in X$ .

Требуется для установленного ЛПР порядка  $R^0(X)$  вида (1), (2) или (3) и заданного множества моделей-претендентов многофакторного оценивания  $P_\delta(x, q_M), \delta \in \Delta$ , выбрать лучшую из моделей  $\delta^0 \in \Delta$  и подобрать наилучшие значения ее параметров  $q_M^0 = [q_\Xi^0, q_\Lambda^0, q_B^0] \in Q_M$ .

### 3. Математические модели и метод решения задачи

При разработке метода решения общей задачи структурно-параметрической идентификации ФОП учитывались характерные особенности подзадач и методов их решения. В частности, для задачи компараторной идентификации весовых коэффициентов частных критериев [2]: не менее двух коэффициентов каждого уравнения или неравенства (13)–(15) должны иметь противоположные знаки; при формировании предпочтений ЛПР информативен только выбор на множестве Парето  $X^K$ ; исходное множество альтернатив  $X$  должно содержать не менее двух противоречивых альтернатив.

С учетом целесообразности предварительного выделения на исходном множестве альтернатив  $X = \{x\}$  подмножества Парето (эффективных альтернатив)  $X^K \subseteq X$  и выбора вида  $\delta \in \Delta$  модели  $P_\delta(x, q_M)$  исходная схема параметрической компараторной идентификации ФОП (рис. 1) для решения задач структурно-параметрической идентификации должна быть преобразована (рис. 2).

Выбор вида модели  $\delta^0 \in \Delta$  и наилучших значений параметров  $q_M^0 \in Q_M$ , в соответствии с целью решения задачи, может быть проведен по критерию минимума погрешности восстановления предпочтений ЛПР

$$S = \sum_{j=1}^n |g^0(x_j) - g(x_j, q_M)| \rightarrow \min_{q_M \in Q_M}, \quad (17)$$

где  $n = \text{Card } X$  — мощность множества альтернатив;  $g^0(x_j), g(x_j, q_M)$  — порядковые номера альтернативы  $x_j$  в предпочтениях ЛПР  $R^0(X)$  и полученном на

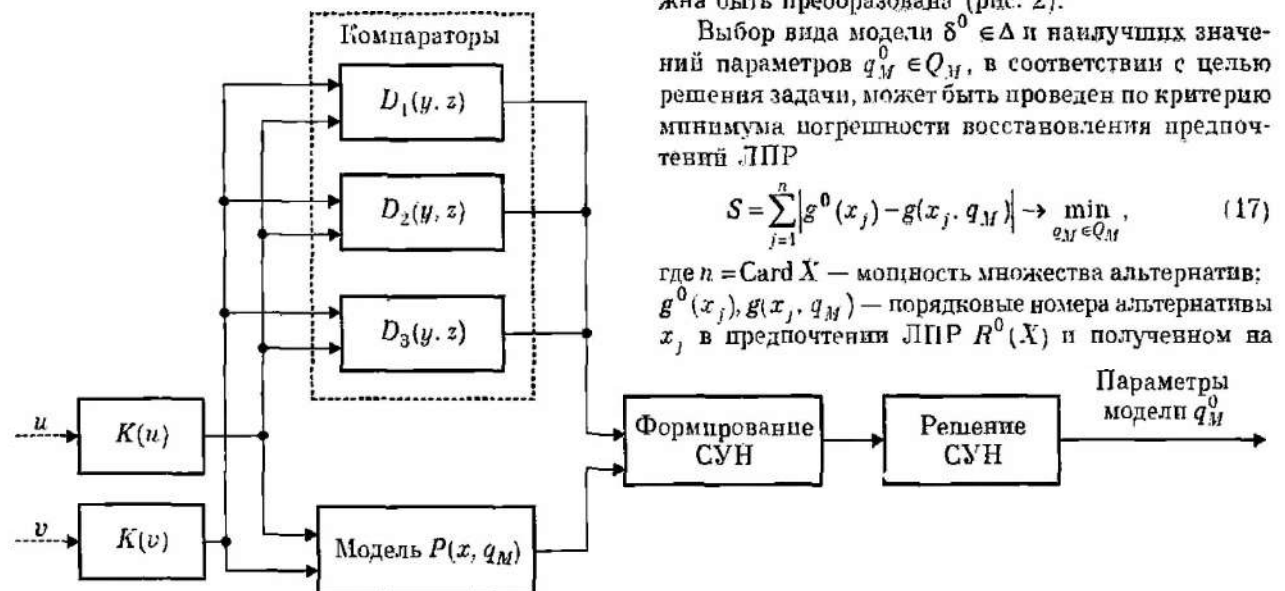


Рис. 1. Схема компараторной параметрической идентификации ФОП

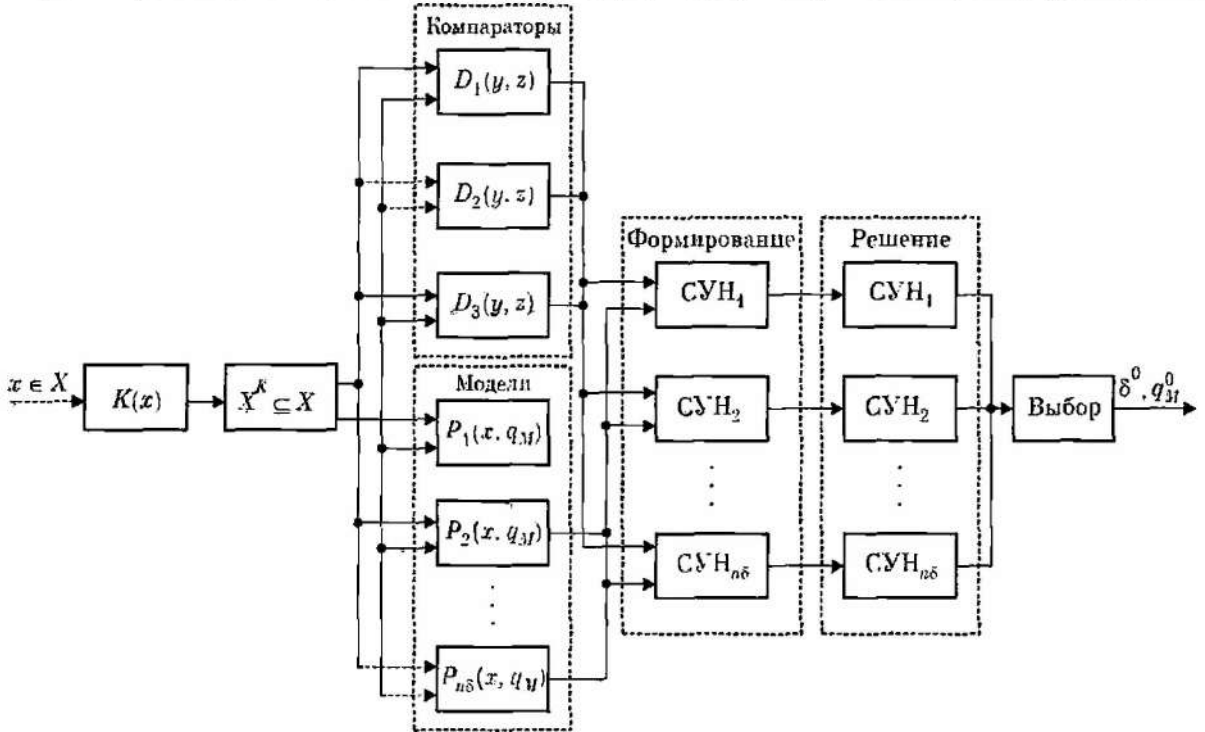


Рис. 2. Схема компараторной структурно-параметрической идентификации ФОП

основании значений ФОП с вектором параметров  $q_M \in Q_M$ .

Для определения единственного решения  $\delta^0 \in \Delta$  и  $q_M^0 \in Q_M$  требуется регуляризация задачи (17), т. е. введение дополнительного критерия. Для предпочтений ЛПР в виде (1) на основе отношения  $R_S(X)$  в качестве критериев предлагается использовать максимум минимальной разности ФОП смежных альтернатив  $x_j, x_{j+1} \in R^0(X)$

$$S = \min_j \{P_\delta(x_j, q_M) - P_\delta(x_{j+1}, q_M)\} \rightarrow \max_{q_M} \quad (18)$$

или максимум суммы разностей ФОП смежных альтернатив

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} |P_\delta(x_j, q_M) - P_\delta(x_{j+1}, q_M)| \rightarrow \max_{q_M} \quad (19)$$

где  $n = \text{Card } X$  — мощность множества альтернатив;  $P_\delta(x_j, q_M)$  — значение ФОП вида  $\delta \in \Delta$  со значениями параметров  $q_M$  для альтернативы  $x_j$ .

Для предпочтений ЛПР, которые могут быть выражены в виде отношения эквивалентности  $R_E(X)$ , в качестве критерия предлагается использовать минимум суммы модулей разности значений ФОП

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} |P_\delta(x_j, q_M) - P_\delta(x_{j+1}, q_M)| \rightarrow \min_{q_M} \quad (20)$$

Для предпочтений ЛПР вида (2) необходимо предварительно выделить бинарные отношения строгого предпочтения  $R_S(X)$  и эквивалентности  $R_E(X)$ . Тогда в качестве критерия идентификации можно использовать отношение вида

$$S(q_M) = S_E(q_M) + \frac{1}{S_S(q_M)} \rightarrow \min_{q_M \in Q_M} \quad (21)$$

где

$$S_E(q_M) = \sum_{x_i, x_j \in R_E(X)} |P_\delta(x_i, q_M) - P_\delta(x_j, q_M)|;$$

$$S_S(q_M) = \sum_{x_i, x_j \in R_S(X)} |P_\delta(x_i, q_M) - P_\delta(x_j, q_M)|.$$

Суть метода решения общей задачи параметрической идентификации моделей многофакторного оценивания состоит в следующем (рис. 2). Предварительно на заданном множестве альтернатив  $X = \{x\}$  по значениям  $K(x)$  выделяется подмножество эффективных  $X^K \subseteq X$ . С этой целью, в зависимости от свойств (выпуклое или невыпуклое) множества  $X = \{x\}$ , могут быть использованы различные методы [12]. Затем формируется начальное значение координат вектора весовых коэффициентов  $q_\Lambda^{(0)} = [\lambda_i^{(0)}]_{i=1}^m$ , удовлетворяющих условию  $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$ . Для него определяются

наилучшие значения параметров ФПЧК  $q_\Xi^{(0)}$ , адаптационных параметров  $q_B^{(0)}$  и соответствующее им значение используемого критерия (18), (19), (20) или (21). На плоскости  $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$  реализуется

схема экстремизации используемого критерия, определяющая последовательность векторов  $q_\Lambda^{(1)}, q_\Lambda^{(2)}, \dots, q_\Lambda^0$  с выбором для каждого из них лучших значений параметров  $q_\Xi^{(j)}, q_B^{(j)}, j = 1, 2, \dots$ .

В зависимости от требований к точности решений, имеющихся временных и вычислительных ресурсов для реализации схем поиска вектора

$q_M^0 = [q_{\Xi}^0, q_{\Lambda}^0, q_B^0] \in Q_M$  предлагается использовать множество методов: сеток, случайного поиска, эволюционного поиска, оптимизации по парам координат и их модификации.

Суть метода оптимизации по парам координат для решения задачи выбора весовых коэффициентов состоит в следующем. Для выбранного значения шага изменения параметров  $h$  на плоскости  $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$

последовательно реализуется схема экстремизации по парам координат  $\lambda_1, \lambda_2; \lambda_1, \lambda_3; \dots; \lambda_{m-1}, \lambda_m$  при фиксированных значениях других координат. Определяется последовательность векторов  $q_{\Lambda}^{(1)}, q_{\Lambda}^{(2)}, \dots, q_{\Lambda}^{(m)}$  с выбором на каждом шаге лучших значений параметров  $q_{\Xi}^{(0)}, q_B^{(0)}$ . Процедура повторяется до тех пор, пока  $C_m^2$  последовательных попыток улучшить значение критерия по парам координат  $\lambda_i, \lambda_j, \forall i, j = 1, m$  не станут безуспешными. Для повышения точности решений может быть использована процедура мультистарта.

Предложенный метод решения общей задачи параметрической идентификации моделей многофакторного оценивания апробирован, показал свою работоспособность и эффективность на контрольных примерах. При решении контрольных задач все методы позволили определить вектора параметров  $q_M^0 \in Q_M$ , обеспечивающие полное восстановление исходных предпочтений  $R^0(X^K)$ , представляемых в виде (1).

Для различных ограничений по точности и времени решения предложены модификация методов параметрической идентификации универсальных функций полезности частных критериев. Установлено, что предложенные модификации метода сеток не значительно уступают базовому методу по точности, по существу выигрывают у него по времени решения. Это дает возможность использовать их при решении общих задач параметрической или структурно-параметрической идентификации моделей многофакторного оценивания.

#### 4. Выводы

Получил дальнейшее развитие подход компараторной идентификации в части его применения к решению общей задачи структурно-параметрического синтеза моделей многофакторного оценивания. Исходя из современного уровня развития средств вычислительной техники и методов математического программирования, как актуальная сформулирована постановка общей задачи параметрической идентификации моделей многофакторного оценивания, предполагающая совместное определение параметров функций полезности частных критериев  $q_{\Xi} = [q_{\xi_j}]_{j=1}^m$ , адаптационных параметров  $q_B = [\beta_i]_{i=1}^{n_B}$  и значений весовых коэффициентов частных критериев  $q_{\Lambda} = [\lambda_i]_{i=1}^m$ . Предложены методы идентификации параметров ФПЧК  $q_{\Xi} = [q_{\xi_j}]_{j=1}^m$  и весовых коэффициентов  $q_{\Lambda} = [\lambda_i]_{i=1}^m$  и на их основе решения

общей задачи параметрической идентификации моделей многофакторного оценивания. В рамках этой задачи без использования дополнительной информации становится возможным идентифицировать ФПЧК  $q_{\Xi} = [q_{\xi_j}]_{j=1}^m$  и таким образом повысить адекватность моделей оценивания.

Полученные результаты могут быть использованы в системах проектирования, управления, искусственного интеллекта. Их применение позволяет повысить адекватность моделей многофакторного оценивания и выбора решений, сократить время принятия решений, повысить их качество. Направлением дальнейших исследований может быть анализ эффективности моделей и методов решения частных задач с целью формирования комплексов для решения задач структурно-параметрической идентификации ФОП в зависимости от размерности задачи, требуемой точности, имеющихся вычислительных и временных ресурсов.

Список литературы: 1. Макаров Н. М., Виноградская Т. М., Рубинский А. А., Соколов В. В. Теория выбора и принятия решений. — М.: Наука, 1982. — 328 с. 2. Овезгельдыев А. О., Петров Э. Г., Петров К. Э. Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизации. — К.: Наук. думка, 2002. — 164 с. 3. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ. — М.: Наука, 1991. — 432 с. 4. Бескоровайный В. В., Трофименко И. В. Структурно-параметрическая идентификация моделей многофакторного оценивания // Системы озброєння і військова техніка. — 2006. — № 3 (7). — С. 56–59 5. Бескоровайный В. В., Трофименко И. В. Параметрическая идентификация функции общей полезности для многофакторного оценивания и выбора решений // 36. наук. праць Харківського ун-ту повітряних сил. — Харків: ХУ ПС, 2006. — Вип. 6. № 12. — С. 63–66. 6. Бескоровайный В. В., Трофименко И. В. Параметрическая идентификация мультипликативных моделей для многофакторного выбора решений // 36. наук. праць Харківського ун-ту повітряних сил. — Х.: ХУ ПС, 2005. — Вип. 5. № 5. — С. 74–78. 7. Петров Э. Г., Шило Н. С. Методика оценки адекватности моделей точечной идентификации индивидуальных предпочтений ЛПП // Радиоэлектроника и информатика. — 2003. — № 2. — С. 97–103. 8. Анфилатов В. С., Емельянов А. А., Кукушкин А. А. Системный анализ в управлении. — М.: Финансы и статистика, 2003. — 368 с. 9. Петров Э. Г., Булавин Д. А., Петров К. Э. Использование метода генетических алгоритмов для решения задачи структурно-параметрической идентификации модели индивидуального многофакторного оценивания // Проблемы биоптики. — 2004. — № 60. — С. 17–26. 10. Бриджман Т. Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. — М.: Радио и связь, 1984. — 287 с. 11. Петров Э. Г., Бескоровайный В. В., Пискалова В. П. Формирование функций полезности частных критериев в задачах многокритериального оценивания // Радиоэлектроника и информатика. — 1997. — № 1. — С. 71–73. 12. Бескоровайный В. В. Формирование множества эффективных вариантов при решении задач структурного синтеза территориально распределенных объектов // Радиоэлектроника и информатика. — 2003. — № 4. — С. 113–116.

Поступила в редколлегию 18.10.2006

УДК 519.71

О. Г. Руденко, А. В. Островерхий, Н. Н. Островерхая  
**АППРОКСИМАЦИЯ МНОГОМЕРНЫХ ФУНКЦИЙ  
 С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ СМАС**

**1. Введение**

Искусственная нейронная сеть (ИНС) СМАС, предложенная Дж. Альбусом [1] для управления роботом-манипулятором, хорошо зарекомендовала себя при решении задач управления, идентификации, кодирования, обработки и сжатия изображений, т. е. задач, в которых используется аппроксимация каких-либо функций. В данных задачах размерность рассматриваемых пространств обычно не превышает трех. В свою очередь задача аппроксимации существенно усложняется с увеличением размерности решаемой задачи.

Целью данной работы является изучение различных архитектур СМАС, позволяющих эффективно решить задачу аппроксимации нелинейных функций большой размерности.

**2. Архитектура сети СМАС**

Сеть СМАС, пример которой приведен на рис. 1, в общем случае осуществляет следующие преобразования:

$$S: X \Rightarrow A, \tag{1}$$

$$P: A \Rightarrow y. \tag{2}$$

где  $X$  —  $N$ -мерное пространство непрерывных входных сигналов;  $A$  —  $n$ -мерное пространство ассоциаций;  $y$  — вектор выходных сигналов.

Преобразование (1) соответствует кодированию информации

$$a = S(x), \tag{3}$$

а преобразование (2) — вычислению выходного сигнала.

Входной слой состоит из нейронов (возбужденные нейроны отмечены на рис. 1 темным цветом).

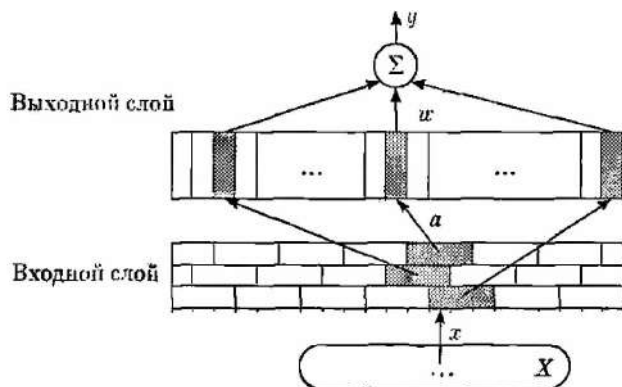


Рис. 1. Структура сети СМАС

имеющих, как правило, одинаковые базисные (активационные) функции (БФ). В традиционной сети СМАС БФ выбраны прямоугольными с единичной амплитудой, поэтому в данной сети преобразование (2) осуществляется в соответствии с формулой:

$$\hat{y} = P(a) = a^T w = S(x)^T w. \tag{4}$$

Таким образом, сеть СМАС работает по принципу ассоциативной памяти. Ассоциативные свойства СМАС проявляются в используемом виде адресации, основанном на специальном кодировании входной информации. Максимальное количество ассоциативных нейронов — ячеек памяти для хранения весовой информации — можно определить по формуле:

$$n_{max} = \left\lfloor \rho \left( \frac{R-1}{\rho} + 1 \right)^N \right\rfloor. \tag{5}$$

где  $R$  — используемое число уровней квантования входных сигналов;  $\rho$  — число ступеней квантования;  $N$  — размерность входного вектора  $x$ ;  $\lfloor \bullet \rfloor$  означает округление в сторону ближайшего большего целого числа.

Обучение сети СМАС, как практически и всех других ИНС, заключается в настройке вектора ее весовых параметров  $w$  размерности  $n \times 1$ . В традиционной СМАС [1, 2] на каждом такте обучения сети предъявляются обучающие пары  $\{x(k), y(k)\}$ , где  $y(k)$  — значение функции, соответствующее  $x(k)$ , и корректируются лишь те ее  $\rho$  весов, которые соответствуют единичным компонентам вектора ассоциаций для данного вектора  $x(k)$ . При этом правило обучения для всех  $i, j$ , для которых  $a_i(k) = a_j(k) = 1$ , имеет вид:

$$w_j(k+1) = w_j(k) + \gamma \cdot \left( y(k) - \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^{\rho} w_i(k) \right), \tag{6}$$

где  $\gamma \in (0, 1]$  — параметр, влияющий на скорость обучения.

**3. Выбор базисных функций**

Выбор БФ играет важную роль в формировании аппроксимирующих свойств сети СМАС. Как было отмечено выше, традиционная сеть СМАС использует БФ прямоугольной формы, однако в некоторых задачах такой выбор является неэффективным, а в ряде случаев и неприемлемым. Если в сети используются нейроны с базисными функциями, отличными от прямоугольной, то преобразование (4) принимает вид

$$\hat{y} = a^T \Phi(x)w, \quad (7)$$

$$\text{где } \Phi(x) = \begin{bmatrix} \Phi_1(x) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \Phi_2(x) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \Phi_n(x) \end{bmatrix},$$

$\Phi_i(x) = \prod_{j=1}^N \varphi_{ij}(x_j)$ ,  $\varphi_{ij}(x_j)$  — значение выбранной базисной функции в точке  $x_j$ .

При выборе БФ прямоугольной формы вычислительные затраты будут минимальными, так как во входном слое сети вместо вычисления значений функций активации для каждого возбужденного нейрона достаточно определить какие нейроны возбуждены и подать на их выходы сигнал, равный единице. Скорость обучения сети при выборе базисных функций прямоугольной формы будет максимальной. Существенным также является тот факт, что в сети СМАС с БФ прямоугольной формы схема кодирования информации не влияет на точность аппроксимации, т. е. любая схема кодирования является приемлемой [3]. Однако сети с единичными БФ, помимо невысокой точности осуществляемой кусочно-постоянной аппроксимации, обладают еще одним недостатком: давние сети не применимы в случаях, когда требуется дифференцирование БФ.

Существует целый класс монотонно дифференцируемых БФ, лишенных данного недостатка. Так, в работах [3, 4] предложено в качестве базисных применять гауссовские функции, а в [6] — В-сплайны различных порядков, основным достоинством которых, помимо дифференцируемости на всей области определения, является простота вычисления их производных. Однако в [3] отмечено, что данные БФ имеют вблизи границы области квантования (зоны чувствительности нейрона входного слоя) сравнительно небольшие значения, что негативно сказывается на результатах аппроксимации, и для избежания указанного недостатка в качестве базисных рекомендуется использование тригонометрических функций, например, косинусоидальной

$$\Phi(x) = \begin{cases} \cos\left(\pi \cdot \frac{x-m}{\lambda}\right), & \text{при } x \in \left[m - \frac{\lambda}{2}; m + \frac{\lambda}{2}\right]; \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (8)$$

где  $m$  — центр гиперкуба,  $\lambda$  — длина гиперкуба.

Она также позволяет легко вычислять производные произвольных порядков и равна нулю на границах области определения.

Еще более простыми и в то же время эффективными являются, на наш взгляд, БФ параболической формы. Параболические БФ имеют форму, близкую к тригонометрическим, и позволяют легко вычислять значение производной, но при этом обладают

еще большей крутизной роста вблизи границ области квантования и требуют значительно меньших вычислительных затрат при их реализации. БФ параболической формы и их производная имеют соответственно вид:

$$\Phi(x) = \begin{cases} 1 - \left(2 \cdot \frac{x-m}{\lambda}\right)^2, & \text{при } x \in \left[m - \frac{\lambda}{2}; m + \frac{\lambda}{2}\right]; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (9)$$

$$\Phi'(x) = -4 \cdot \frac{(x-m)}{\lambda}. \quad (10)$$

Здесь приняты те же обозначения, что и в (8).

Следует отметить, что выбор БФ, отличных от прямоугольных, приводит к изменению алгоритма обучения (6), который в этом случае может быть записан так:

$$w(k+1) = w(k) + \gamma(k) \cdot \left( \frac{y(k) - a^T \Phi(x)w(k)}{\|\Phi(x)a(k)\|^2} \Phi(x)a(k) \right), \quad (11)$$

где  $\gamma(k)$  — векторный, в общем случае переменный, параметр.

Свойства алгоритма (11) в значительной степени зависят от выбора  $\gamma(k)$ . Несложно показать, что оптимальное значение этого параметра, обеспечивающее максимальную скорость обучения при отсутствии помех, будет равно единице. Для обеспечения же сходимости алгоритма (11) при наличии помех измерений параметр  $\gamma(k)$  должен удовлетворять условиям Дворецкого. В частности, достаточно эффективным оказывается выбор  $\gamma(k)$  вида

$$\gamma(k) = \gamma \alpha^k, \quad (12)$$

где  $\gamma(k) \in (0, 1)$ ;  $0 < \alpha \ll 1$ .

#### 4. Проблемы аппроксимации многомерных функций сетью СМАС

Как можно видеть из формулы (5), с ростом размерности пространства входных переменных  $N$  объем памяти, требуемый для хранения информации о весах, растет экспоненциально. Ограниченные размеры памяти сужают сферу применения СМАС в реальных приложениях. Кроме того, увеличение размерности  $N$  приводит к возрастанию сложности кодирования информации.

Одним из известных способов решения данной проблемы является хеширование, заключающееся в отображении большой требуемой памяти в меньшую, физически реализуемую. Однако при этом неизбежно возникает проблема хеш-коллизий, заключающихся в появлении нежелательной корреляции между входными сигналами, весьма отрицательно сказывающихся на аппроксимирующих свойствах сети [7].

В качестве более эффективного способа уменьшения объема требуемой памяти в сети СМАС при работе с многомерными объектами в [4] предлагается построение перархической структуры СМАС (Hierarchical СМАС — НСМАС), состоящей из нескольких более простых модулей, например, двумерных СМАС. На рис. 2 приведена наименьшая топология НСМАС, учитывающая, что каждая СМАС содержит два входа и выходной сигнал СМАС первого слоя является входным сигналом для СМАС второго слоя и т. д. Архитектура НСМАС может быть соответственно расширена с использованием данной топологии бинарного дерева.

На рис. 2 использованы следующие обозначения:  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) —  $i$ -й вход нейронной сети НСМАС;  $y_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $l = 1, 2, \dots, L$ ) — выход  $j$ -го СМАС слоя  $l$ ;  $n$  — число сетей СМАС в слое  $l$ ;  $y(x)$  — выходной сигнал НСМАС для входного сигнала  $x$ .

Если выбранные БФ дифференцируемы, то для обучения данной сети (настройки ее параметров) может быть применен алгоритм обратного распространения ошибки, когда вначале настраиваются параметры СМАС выходного слоя  $L$ , а затем ошибка распространяется в обратном направлении от  $L$ -го слоя к  $(L - 1)$ -му скрытому слою для настройки параметров СМАС  $(L - 1)$ -го слоя и т. д. При этом в качестве минимизируемого параметра выбирается квадратичный функционал ошибки

$$E = \frac{1}{2} (\hat{y}(x) - y(x))^2, \quad (13)$$

где  $y(x)$ ,  $\hat{y}(x)$  — требуемый и реальный выходные сигналы НСМАС для входного сигнала  $x$  соответственно.

Таким образом, обобщенная процедура настройки сети может быть записана так.

1) *Настройка СМАС выходного слоя* — практически ничем не отличается от настройки обычной

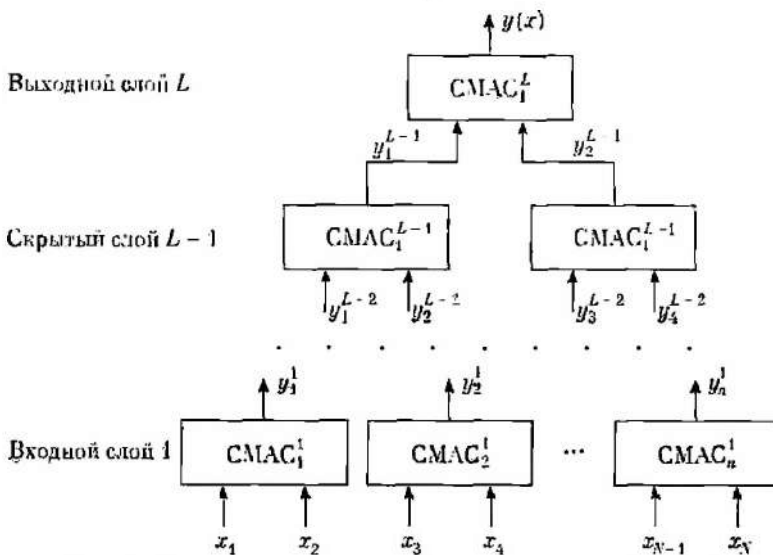


Рис. 2. Топологическая структура нейронной сети НСМАС

двухвходовой СМАС, например по алгоритму (11), за исключением того, что входными для данного слоя являются выходные сигналы предыдущего слоя.

2) *Настройка сетей СМАС скрытых слоев* по правилу

$$w_h^l(k+1) = w_h^l(k) + \gamma \cdot (\hat{y}_{[h/2]}^{l+1}(y^l) - y_{[h/2]}^{l+1}(y^l)) \times \frac{\partial y_{[h/2]}^{l+1}(x)}{\partial y_h^l} \cdot \Phi(y^l) a(k), \quad (14)$$

где

$$\frac{\partial y_{[h/2]}^{l+1}(x)}{\partial y_h^l} = \sum_{i=1}^p a_i(y^l) \cdot w_{hi}^l \cdot \left[ \prod_{j=2}^{[2]^{h/2}+1} \Phi_j(y_j^l) \right] \cdot \frac{\partial \Phi_i(y_h^l)}{\partial y_h^l}, \quad (15)$$

$h = 1, 2, \dots, n$ ;  $w_{hi}^l$  — значение веса в  $i$ -й ячейке памяти СМАС $_h$  слоя  $l$ .

Данная процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто требуемое значение критерия ошибки либо заданное максимальное число итераций обучения.

Известные проблемы, сопутствующие реализации алгоритма обратного распространения ошибки, при исследовании многомерных функций могут быть исключены при использовании другого подхода — применения Low-Dimensional-СМАС-Based сетей (LDB СМАС), предложенных в [8]. Пример структуры LDB СМАС сети показан на рис. 3, где  $m$  — число СМАС,  $N$  — число входных переменных.

В основе данной структуры лежит множество малоразмерных (базовых) сетей СМАС (например, двумерных), на которые подаются все возможные парные комбинации входных сигналов. Взвешенные веса  $z_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) выходы этих СМАС формируют общий выход сети

$$y(x) = \sum_{i=1}^m y_i(x) z_i, \quad (16)$$

где  $y_i(x)$  — выходное значение  $i$ -й сети СМАС;  $z_i$  — вес соответствующего выхода  $y_i(x)$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ).

Данная архитектура дает возможность создания и неполных структур, в которых участвуют не все возможные комбинации пар входных переменных, а лишь часть их.

Процедура обучения сети LDB СМАС состоит в следующем:

1) *Настройка весов  $z_i$* , например, по алгоритму

$$z(k+1) = z(k) + \frac{y(x) - (x) Y(k)}{\|Y(k)\|^2} Y(k), \quad (17)$$

где  $Y(k) = (y_1(k), y_2(k), \dots, y_m(k))$  — вектор выходов базовых сетей СМАС.

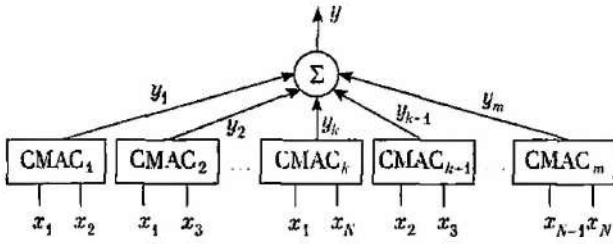


Рис. 3. Структура сети LDB СМАС

2) Настройка параметров базовых сетей СМАС<sub>i</sub> (i = 1, 2, ..., m) по правилу

$$w(k+1) = w(k) + \frac{y(x) - \hat{y}(x)}{\|\Phi(k)a(x)\|^2} \Phi(k)a(x). \quad (18)$$

Следует отметить, что данная структура не является иерархической, что позволяет применять градиентный метод обучения при выборе БФ любой формы, включая прямоугольную.

5. Экспериментальные исследования

Исследования производились на ПК с процессором Intel Pentium 4 3,2 GHz в среде MatLab 7.0 под ОС Linux 2.6.19.

Все последующие базовые сети СМАС использовали R = 50 уровней квантования, распределенных по p = 10 ступеням квантования. Двумерная сеть СМАС с такими характеристиками требует 350 ячеек памяти. Обучение сети осуществлялось на выборке из 20 000 случайных точек, равномерно распределенных на интервале [-1; 1].

Рассматривалась задача аппроксимации нелинейной четырехмерной функции F(x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub>, x<sub>3</sub>, x<sub>4</sub>)

$$F(x_1, x_2, x_3, x_4) = x_1 + \sin(\pi x_1) \cdot \cos(\pi x_2) \times \sin(\pi x_3) \cdot (\sin(\pi x_4)^2 - 1). \quad (19)$$

Сечение данной функции при x<sub>2</sub> = x<sub>3</sub> = 0,25, т. е. G(x<sub>1</sub>, x<sub>4</sub>) = F(x<sub>1</sub>, 0,25, 0,25, x<sub>4</sub>) показано на рис. 4.

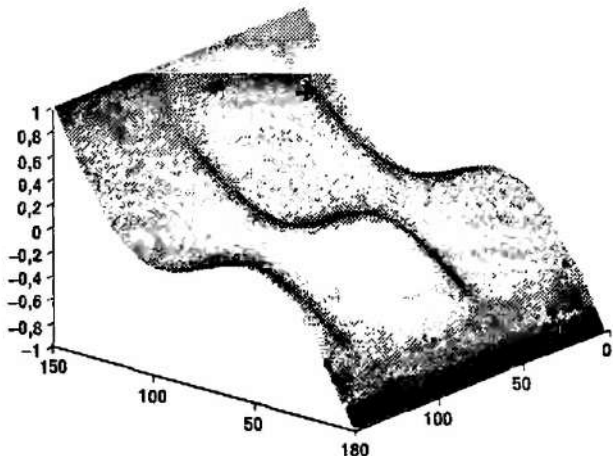


Рис. 4. Вид исходной функции F(x<sub>1</sub>, 0,25, 0,25, x<sub>4</sub>)

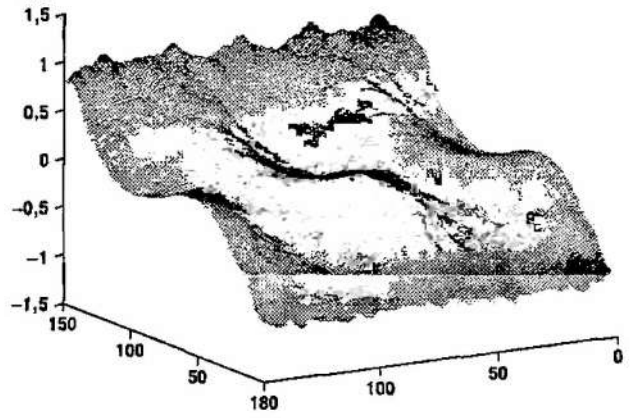


Рис. 5. Аппроксимация сетью СМАС с параболическими БФ без нормализации

Для оценки эффективности работы сетей использовались следующие параметры:

1. Время вычислений в секундах — T;
2. Средняя квадратичная ошибка:

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (y_i(x) - \hat{y}_i(x))^2}{M}}$$

где M — количество экспериментов.

Эксперимент 1. Целью данного эксперимента было исследование выбора различных БФ и нормализаций.

Некоторые результаты вычислений при отсутствии и наличии того или иного вида нормализации приведены в табл. 1 и на рис. 5–7. Здесь приняты следующие сокращения: БН — без нормализации.

Таблица 1

Вид базисных функций	БН		НЧП		ПГК		НЧП+ПГК	
	T, с	MSE, 10 <sup>-3</sup>	T, с	MSE, 10 <sup>-3</sup>	T, с	MSE, 10 <sup>-3</sup>	T, с	MSE, 10 <sup>-3</sup>
Единичные	2.55	0.8492	2.76	203.06	2,8	3.7192	2.94	3.8069
Параболические	2.58	0.5479	2,84	201.31	2.83	3,1207	3.07	3.4224
Тригонометрические	2.62	0.7038	2,93	200.69	2.84	3.1259	3,09	3.0222

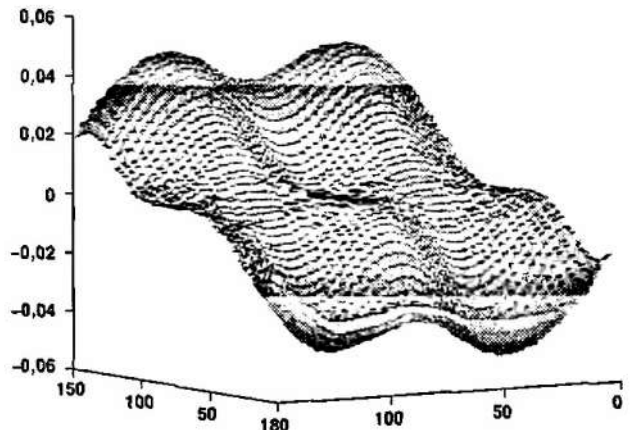


Рис. 6. Аппроксимация сетью СМАС с единичными БФ и нормализацией по частным переменным

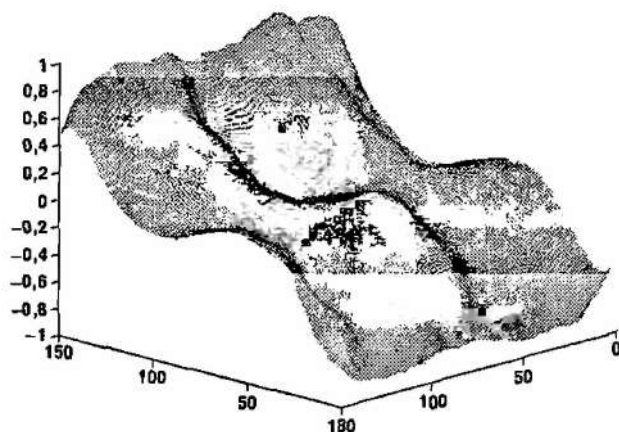


Рис. 7. Аппроксимация сетью СМАС с тригонометрическими БФ с нормализацией по частным переменным и по гиперкубам

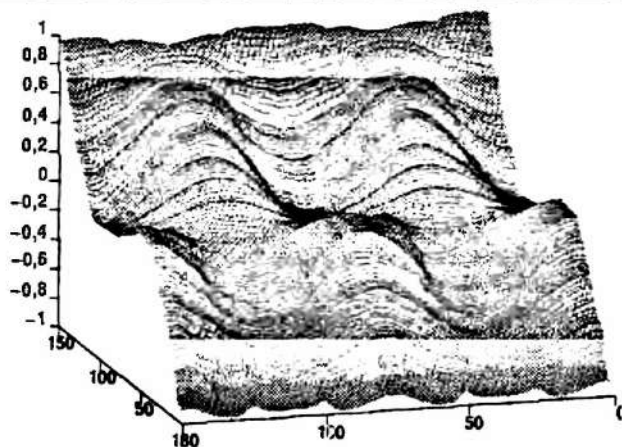


Рис. 8. Аппроксимация функции  $F(x_1, 0.2...0.3, 0.2...0.3, x_4)$  сетью НСМАС с параболическими БФ

НЧП — использовалась нормализация по частным входным переменным. НГК — нормализация по вычисленным значениям гиперкубов и НЧП+НГК — использование обоих видов нормализации.

Очевидно, что нормализация позволяет получать более сглаженные результаты, но при этом значительно ухудшает обучаемость сети. Принципиальной разницы в используемых БФ нет, по крайней мере, в случае применения подобной вычислительной базы. Разница во времени вычислений не столь значительна, так как операции с матрицами создают большую вычислительную нагрузку, чем расчет значений БФ. Тем не менее, разница есть как в значениях ошибки аппроксимации, так и во времени вычислений. Следовательно, БФ параболической формы являются более предпочтительными, так как обеспечивают наилучшие аппроксимирующие свойства сети СМАС при сравнительно небольших вычислительных затратах.

*Эксперимент 2.* Целью следующего эксперимента было исследование аппроксимации многомерных функций сетями СМАС различной архитектуры.

В качестве моделируемой использовалась также функция  $G(x_1, x_2) = F(x_1, 0.25, 0.25, x_4)$  и ее окрестности:  $F(x_1, 0.2...0.3, 0.2...0.3, x_4)$  и  $F(x_1, 0...0.5, 0...0.5, x_4)$ .

Результаты исследований приведены в табл. 2 и на рис. 8–10. Здесь приняты следующие обозначения: НСМАС — иерархическая сеть СМАС, состоящая из трех СМАС (одной — в выходном и двух — в скрытом слоях); LDB6 — LDB СМАС с полным набором парных комбинаций входных переменных, состоящая из 6 сетей СМАС со входами  $(x_1, x_2), (x_1, x_3), (x_1, x_4), (x_2, x_3), (x_2, x_4),$

$(x_3, x_4)$ ; LDB3 — LDB СМАС, состоящая из трех сетей СМАС со входами  $(x_1, x_2), (x_1, x_4), (x_3, x_4)$ .

Для аппроксимации такой функции обычной четырехмерной СМАС согласно формуле (5) потребовалось бы 12 119 ячеек памяти. Как видно из табл. 2, данные методы позволяют сократить объем требуемой СМАС памяти для хранения весовых коэффициентов примерно в 5–11 раз, сохраняя при этом

Таблица 2

Тип сети	Вид базисных функций	Дисперсия траекторий	Объем памяти, ячеек	$T, c$	$MSE, 10^{-3}$
НСМАС	тригонометрический	0	1050	9.88	0.3534
НСМАС	параболический	0	1050	9.59	0.4176
LDB3	единичный	0	1053	10.21	0.4865
LDB3	тригонометрический	0	1053	10.62	0.1970
LDB3	параболический	0	1053	10.29	0.1528
LDB6	единичный	0	2106	20.21	0.5608
LDB6	тригонометрический	0	2106	20.31	0.1893
LDB6	параболический	0	2106	19.97	0.1274
НСМАС	тригонометрический	0.1	1050	9.79	0.7429
НСМАС	параболический	0.1	1050	9.56	0.7301
LDB3	единичный	0.1	1053	10.14	0.8628
LDB3	тригонометрический	0.1	1053	10.51	0.4083
LDB3	параболический	0.1	1053	10.33	0.2667
LDB6	единичный	0.1	2106	20.05	0.6004
LDB6	тригонометрический	0.1	2106	20.76	0.1751
LDB6	параболический	0.1	2106	20.45	0.1552
НСМАС	тригонометрический	0.5	1050	9.95	3.9341
НСМАС	параболический	0.5	1050	9.55	3.0587
LDB3	единичный	0.5	1053	10.20	2.4866
LDB3	тригонометрический	0.5	1053	10.87	5.6368
LDB3	параболический	0.5	1053	10.32	4.5994
LDB6	единичный	0.5	2106	19.75	1.7994
LDB6	тригонометрический	0.5	2106	20.41	2.3533
LDB6	параболический	0.5	2106	20.05	2.2995

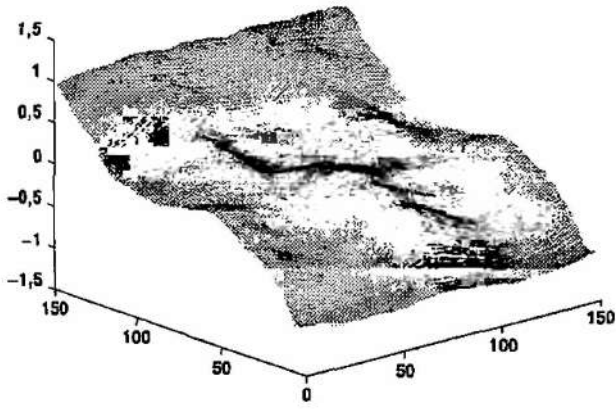


Рис. 9. Аппроксимация функции  $F(x_1, 0...0,5, 0...0,5, x_4)$  сетью LDB3 с тригонометрическими БФ

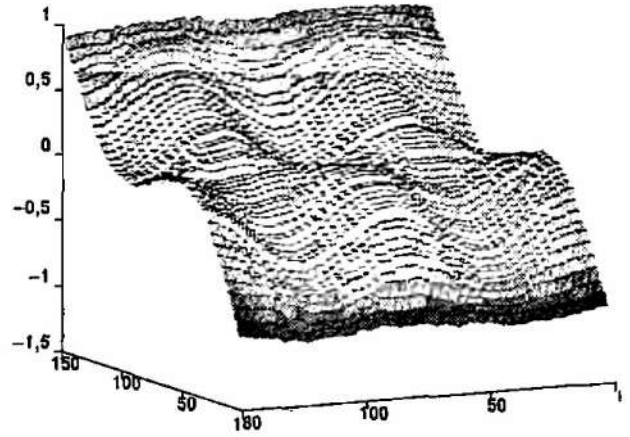


Рис. 10. Аппроксимация функции  $F(x_1, 0...0,5, 0...0,5, x_4)$  сетью LDB6 с тригонометрическими БФ

способность СМАС весьма эффективно аппроксимировать нелинейные многомерные функции.

### 6. Выводы

Результаты исследований свидетельствуют о том, что аппроксимация многомерных функций может быть достаточно эффективно осуществлена путем применения либо перархической (НСМАС), либо линейной (LDB) СМАС, образованной сетями малой размерности, архитектур сетей СМАС.

Если в первом случае используемые БФ должны быть дифференцируемыми, то во втором — произвольными. Среди дифференцируемых наиболее простой и в то же время весьма эффективной является параболическая функция. Использование в данных сетях операции нормализации, приводя к более гладким поверхностям, получаемым в результате аппроксимации, ухудшает обучаемость сети. Однако во всех случаях удается существенно сократить объем требуемой памяти сети.

Список литературы: 1. *Albus J. S.* A new approach to manipulator control: the cerebellar model articulation controller (CMAC) // *ASME Trans., J. Dynamic Systems, Measurement and Control.* — 1975. — 97. № 3. — P. 220–227. 2. *Jou C. -C.* A fuzzy cerebellar model articulation controller // *IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems.* — 1992. — P. 1171–1178. 3. *Руденко О. Г., Бессонов А. А.* О выборе базисных функций в нейронной сети СМАС // *Проблемы управления и информатики.* — 2004. — № 2. — С. 143–155. 4. *Lee H. -M., Chen Ch. -M., Lu Yu. -F.* A Self-organizing HCMAC Neural Network Classifier // *IEEE Transactions on Neural Networks.* — 2003. — 14, № 1. — P. 15–26. 5. *Chiang Ch. -T., Lin Ch. -Sh.* CMAC with General Basis Functions // *Neural Networks.* — 1996. — 9, № 7. — P. 1199–1211. 6. *Lane S. H., Handelman D. A., Gelfand J. J.* Theory and development of higher-order CMAC neural networks // *IEEE Control Systems.* — 1992. — 12, № 2. — P. 23–30. 7. *Wang Z. -Q., Jeffrey L. Schiano, Ginsberg M.* Hash-Coding in CMAC Neural Networks // *IEEE Int. Conf. on Neural Networks.* — 1996. — 3. — P. 1698–1703. 8. *Lin Ch. -Sh., Li Ch. -K.* A Low-Dimensional-CMAC-Based Neural Network // *IEEE Int. Conf. on Neural Networks.* — 1996. — P. 1297–1302.

Поступила в редакцию 28.11.2006

УДК 519.7

И. А. Ефимова, В. А. Лециевский., В. В. Токарев, Г. Г. Четвериков

## СИНТЕЗ БИНАРНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

### 1. Введение

Развитие и совершенствование средств вычислительной техники является базой для автоматизации умственной деятельности человека. Однако успехи в области интеллектуализации вычислительной техники незначительны, если сравнивать достигнутые результаты с ожидаемыми и их прогнозами. Ориентация на достижение высококачественной технологии обработки информации проявляется в попытках реализовать на фон-неймановских компьютерах системы искусственного интеллекта (ИИ). Следовательно, новые требования к технологии обработки информации обусловлены необходимостью решать проблемы, с трудом поддающиеся формализации, и надпчем пользователя, который не является профессиональным программистом [1].

В области ИИ существует проблема применения научных знаний о естественном языке к решению различных практических задач, таких как автоматический машинный перевод, распознавание рукописных текстов и звучащей речи, автоматическое индексирование и реферирование текстов, создание лингвистических корпусов текстов естественного языка, морфологическая, синтаксическая, семантическая разметка текстов и многие др. Использование механизмов естественного языка в информационно-компьютерных и человеко-машинных системах обеспечивает создание качественно новых средств обработки информации для интеллектуализации работы с текстами. Несмотря на то, что многие механизмы естественного языка уже формализованы, проблема формализации естественного языка остается по-прежнему актуальной [2, 3].

### 2. Логическая интерпретация моделирования естественного языка

Основные публикации последних лет в области ИИ четко и ясно определили главную проблему и кратчайший путь к созданию систем искусственного интеллекта — моделирование морально-этических норм и законов. Очевидно, что единственным известным нам объективным носителем морали и интеллекта является человек, а средством внешнего общения и выражения интеллекта является человеческая речь. Структуризация языка осуществляется через формирование базового набора отношений (их число не превышает 200): временных, пространственных, каузальных, классифицирующих, кластеризирующих, лингвистических и др.

Выявлению и формированию последних (лингвистических отношений), их представлению в виде соответствующих реляционных моделей, описан-

ных уравнениями алгебры конечных предикатов (АКП), а также аппаратными методам решения этих уравнений и посвящена данная статья.

В научном мире уделяется большое внимание исследованию проблемы моделирования механизмов естественного языка (ЕЯ), а также развитию и совершенствованию средств вычислительной техники для ее реализации с элементами  $k$ -значного кодирования и параллелизма.

В рамках научной школы по ИИ, возглавляемой М. Ф. Бондаренко, используется математический аппарат, дающий возможность описывать ЕЯ с помощью аппарата логических уравнений, — это алгебра конечных предикатов, предоставляющая широкое возможности перехода от алгоритмического описания информационных процессов к их описанию в виде уравнений, которые и задают отношения между переменными (характеристиками) исследуемого объекта (языка). АКП — это единственный удобный язык для формульного задания отношения символьной информации.

Следует отметить некоторые особенности развития данной области исследований в настоящее время:

- математические модели ЕЯ описываются параллельными алгоритмами АКП, а затем программно обрабатываются на процессорах фон-Неймана последовательного действия;
- вышли из рассмотрения пути создания многозначных широко параллельных средств для обработки символьной информации;
- возникают проблемы размерности систем уравнений алгебры предикатов, вопросы выбора метода их решения и распараллеливания;
- в то же время оптимальное проектирование и техническая реализация вычислительных средств на базе  $k$ -значных структур невозможна без одновременной разработки принципиально новых (нетрадиционных) видов математических моделей и их исследования для различных режимов работы, а главное, интерпретации результатов моделирования [4].

Следует отметить, что одним из перспективных направлений применения теории многозначных структур и кодирования в системах искусственного интеллекта является процесс моделирования естественного языка. Этот подход позволяет наряду с развитием и совершенствованием вариантов программной реализации полученных моделей языка получить и другой подход — схемный. Мозг при этом рассматривается как отправная точка построения  $k$ -значных пространственных структур языковых систем [3, 4].

Анализ показывает, что ближайшими аппаратными средствами, с помощью которых возможно



#### 4. Функционирование бинарных логических сетей

Функционирующая бинарная логическая сеть представляет собой систему взаимодействующих линейных логических преобразований [6, 7]. Каждая дуга бинарной логической сети представляет собой двунаправленную дугу, которая описывается парой линейных логических преобразований

$$B(y) = \exists x \in M(F(x, y) \wedge A(x)); \quad (1)$$

$$A'(x) = \exists y \in N(F(x, y) \wedge B(y)) \quad (2)$$

и реализуется парой переключательных цепей, построенных с использованием координатного представления соответствующих множеств. Преобразования вида (1)–(2) выражают образ  $B \subseteq N$  множества  $A \subseteq M$  и прообраз  $A'$  множества  $B$  относительно некоторого отображения  $y = f(x)$ , которые определяются предикатом  $F(x, y)$  и называются линейными логическими операторами  $L(A) = B$  и  $L(B) = A'$  с ядром  $F(x, y)$ . Преобразования (1)–(2) характеризуются аддитивностью  $F(A_1 \vee A_2) = F(A_1) \vee F(A_2)$  и однородностью  $F(\alpha A) = \alpha F(A)$ ,  $\alpha \in \{0, 1\}$ .

Рассмотрим пример функционирования дуги бинарной логической сети склонения имен существительных. Возьмем предикат  $P_3(x_3, r)$  и поставим задачу решения логического уравнения  $P_3(x_3, r) = 1$ . Решение поставленной задачи может заключаться в следующем. Если один из аргументов предиката принимает множество значений, тогда требуется отыскать множество всевозможных значений другого аргумента, удовлетворяющих данному логическому уравнению хотя бы при одном значении первого аргумента.

Например, пусть  $x_3 \in \{И, Р, В\}$  и необходимо отыскать всевозможные значения аргумента  $r$ , т. е. множество значений влияния контекста. В этом случае задача заключается в нахождении образа множества  $A = \{И, Р, В\}$  относительно отображения  $f(x_3) = r$ . Воспользуемся формулой линейного логического оператора (1):

$$\begin{aligned} B(r) &= \exists x_3 \in M(F(x_3, r) \wedge A(x_3)) = \\ &= \exists x_3 \in \{И, Р, В, Д, В, Т, П\} (F(x_3, r) \wedge A(x_3)) = \\ &= F(И, r)A(И) \vee F(Р, r)A(Р) \vee F(Д, r)A(Д) \vee \\ &\quad \vee F(В, r)A(В) \vee F(П, r)A(П) = \\ &= F(И, r) \cdot 1 \vee F(Р, r) \cdot 1 \vee F(Д, r) \cdot 0 \vee F(В, r) \cdot 1 \vee \\ &\quad \vee F(Т, r) \cdot 0 \vee F(П, r) \cdot 0 = \\ &= (r^1 \vee r^8 \vee r^9 \vee r^{15} \vee r^{22} \vee r^{26}) \vee \\ &\quad \vee (r^2 \vee r^{10} \vee r^{16} \vee r^{23} \vee r^{27}) \vee \\ &\quad \vee (r^4 \vee r^5 \vee r^6 \vee r^{12} \vee r^{18} \vee r^{19}) \vee \\ &\quad \vee (r^{24} \vee r^{25} \vee r^{28} \vee r^{29}). \end{aligned}$$

Итак, образ множества  $A = \{И, Р, В\} \xrightarrow{f} B = \{1, 2, 4, 5, 8, 9, 10, 12, 15, 16, 18, 19, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29\}$ .

Пусть задано множество типов влияния контекста  $r \in \{2, 5, 9, 24\}$ , которое соответствует окончанию  $a$ , я регулярных имен существительных, и необходимо отыскать всевозможные значения аргумента  $x_3$ . В этом случае задача заключается в нахождении прообраза множества  $B = \{2, 5, 9, 24\}$  относительно отображения  $f(x_3) = r$ . Воспользуемся формулой линейного логического оператора (2):

$$\begin{aligned} A'(x_3) &= \exists r \in M(F(x_3, r) \wedge B(r)) = \\ &= \exists r \in \{1, 2, \dots, 29\} (F(x_3, r) \wedge B(r)) = \\ &= F(x_3, 1)B(1) \vee F(x_3, 2)B(2) \vee \dots \vee F(x_3, 28)B(28) \vee \\ &\quad \vee F(x_3, 29)B(29) = (F(x_3, 1) \cdot 0 \vee F(x_3, 2) \cdot 1 \vee \\ &\quad \vee F(x_3, 3) \cdot 0 \vee F(x_3, 4) \cdot 0 \vee F(x_3, 5) \cdot 1 \vee F(x_3, 6) \cdot 0 \vee \\ &\quad \vee F(x_3, 7) \cdot 0 \vee F(x_3, 8) \cdot 0 \vee F(x_3, 9) \cdot 1) \cdot 0 \vee \\ &\quad \vee F(x_3, 10) \cdot 0 \vee \dots \vee F(x_3, 28) \cdot 0 \vee F(x_3, 29) \cdot 0 = \\ &= x_3^И \vee x_3^Р \vee x_3^В. \end{aligned}$$

Итак, прообраз множества  $B = \{2, 5, 9, 24\} \xrightarrow{f} A' = \{И, Р, В\}$ .

Рассмотрим другой вариант решения исходного логического уравнения, если задано одно значение (а не множество значений) одного из аргументов и необходимо найти те значения другого аргумента, которые удовлетворяют данному логическому уравнению. Например, пусть  $x_3 = В$ , тогда решение данной задачи можно свести к нахождению образа одноэлементного множества  $A = \{В\}$  относительно отображения  $f(x_3) = r$ . По формуле (1) имеем:

$$\begin{aligned} B(r) &= \exists x_3 \in M(F(x_3, r) \wedge A(x_3)) = \\ &= \exists x_3 \in \{И, Р, Д, В, Т, П\} (F(x_3, r) \wedge A(x_3)) = \\ &= F(И, r)A(И) \vee F(Р, r)A(Р) \vee F(Д, r)A(Д) \vee \\ &\quad \vee F(В, r)A(В) \vee F(Т, r)A(Т) \vee F(П, r)A(П) = \\ &= F(И, r) \cdot 0 \vee F(Р, r) \cdot 0 \vee F(Д, r) \cdot 0 \vee F(В, r) \cdot 1 \vee \\ &\quad \vee F(Т, r) \cdot 0 \vee F(П, r) \cdot 0 = \\ &= r^4 \vee r^5 \vee r^8 \vee r^{12} \vee r^{18} \vee r^{19} \vee r^{24} \vee r^{25} \vee r^{28} \vee r^{29}, \end{aligned}$$

т. е. множество влияний контекста  $r = \{4, 5, 8, 12, 18, 19, 24, 25, 28, 29\}$ .

Пусть  $r = 5$ , тогда решение исходной задачи можно свести к нахождению прообраза одноэлементного множества  $B = \{5\}$  относительно отображения  $f(x_3) = r$ . По формуле (2) имеем:

$$\begin{aligned} A'(x_3) &= \exists r \in M(F(x_3, r) \wedge B(r)) = \\ &= \exists r \in \{1, 2, \dots, 29\} (F(x_3, r) \wedge B(r)) = \\ &= F(x_3, 1)B(1) \vee F(x_3, 2)B(2) \vee \dots \vee F(x_3, 28)B(28) \vee \\ &\quad \vee F(x_3, 29)B(29) = F(x_3, 1) \cdot 0 \vee \dots \vee F(x_3, 4) \cdot 0 \vee \\ &\quad \vee F(x_3, 5) \cdot 1 \vee F(x_3, 6) \cdot 0 \vee \dots \vee F(x_3, 29) \cdot 0 = x_3^В, \end{aligned}$$

т. е. аргумент  $x_3 = \{В\}$ . Итак, образ одноэлементного множества  $A = \{В\} \xrightarrow{f} B = \{4, 5, 8, 12, 18, 19, 24, 25, 28, 29\}$ , прообраз одноэлементного множества  $B = \{5\} \xrightarrow{f} A' = \{В\}$ .

**5. Схемная реализация бинарных логических сетей**

Рассмотрим вопрос о схемной реализации бинарных логических сетей на конкретном примере. Возьмем предикат  $P_3$ , связывающий тип влияния контекста  $r$  и падеж формы слова  $x_3$  из модели склонения регулярных имен существительных. Построим отображение  $f(r) = x_3, M = \{1, 2, \dots, 29\}, N = \{И, Р, Д, В, Т, П\}$ :

$$\begin{aligned} \beta_{И} &= r^1 \vee r^8 \vee r^9 \vee r^{15} \vee r^{22} \vee r^{26}; \\ \beta_{Р} &= r^2 \vee r^{10} \vee r^{16} \vee r^{23} \vee r^{27}; \\ \beta_{Д} &= r^3 \vee r^{11} \vee r^{17}; \\ \beta_{В} &= r^4 \vee r^5 \vee r^8 \vee r^{12} \vee r^{18} \vee r^{19} \vee r^{24} \vee \\ &\quad \vee r^{25} \vee r^{28} \vee r^{29}; \\ \beta_{Т} &= r^6 \vee r^{13} \vee r^{14} \vee r^{20}; \\ \beta_{П} &= r^7 \vee r^{21}. \end{aligned} \quad (3)$$

Схема, реализующая отображение (3), представлена на рис. 4.

Схема находит полный образ предмета. Пусть, например,  $r=5$ . Тогда  $\beta_{И}=0, \beta_{Р}=0, \beta_{Д}=0, \beta_{В}=1, \beta_{Т}=0, \beta_{П}=0$ . Полным образом предмета  $\bar{5}$  является  $x_3 \in \{B\}$ .

Для нахождения прообраза предмета необходимо строить схему, реализующую отображение, обратное заданному, то есть схему, действующую в обратном направлении (рис. 5).

Схема находит полный прообраз предмета. Пусть, например,  $x_3 = B$ , тогда  $\beta_{И}=0, \beta_{Р}=0, \beta_{Д}=0, \beta_{В}=1, \beta_{Т}=0, \beta_{П}=0; r \in \{4, 5, 8, 12, 18, 19, 24, 25, 28, 29\}$ .

Построим схему, которая находит образ множества предметов относительно отображения (3) (рис. 6).

Математически эта переключательная цепь описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} \beta_{И} &= \alpha_1 \vee \alpha_8 \vee \alpha_9 \vee \alpha_{15} \vee \alpha_{22} \vee \alpha_{26}; \\ \beta_{Р} &= \alpha_2 \vee \alpha_{10} \vee \alpha_{16} \vee \alpha_{23} \vee \alpha_{27}; \\ \beta_{Д} &= \alpha_3 \vee \alpha_{11} \vee \alpha_{17}; \\ \beta_{В} &= \alpha_4 \vee \alpha_5 \vee \alpha_8 \vee \alpha_{12} \vee \alpha_{18} \vee \alpha_{19} \vee \alpha_{24} \vee \\ &\quad \vee \alpha_{25} \vee \alpha_{28} \vee \alpha_{29}; \\ \beta_{Т} &= \alpha_6 \vee \alpha_{13} \vee \alpha_{14} \vee \alpha_{20}; \\ \beta_{П} &= \alpha_7 \vee \alpha_{21}. \end{aligned} \quad (4)$$

Найдем образ какого-нибудь множества для отображения (4), воспользовавшись схемой на рис. 5. Возьмем, например, следующее множество типов влияний контекста  $r \in \{2, 5, 9, 24\}$ , которые соответствуют окончаниям  $a, я$  имен существительных.

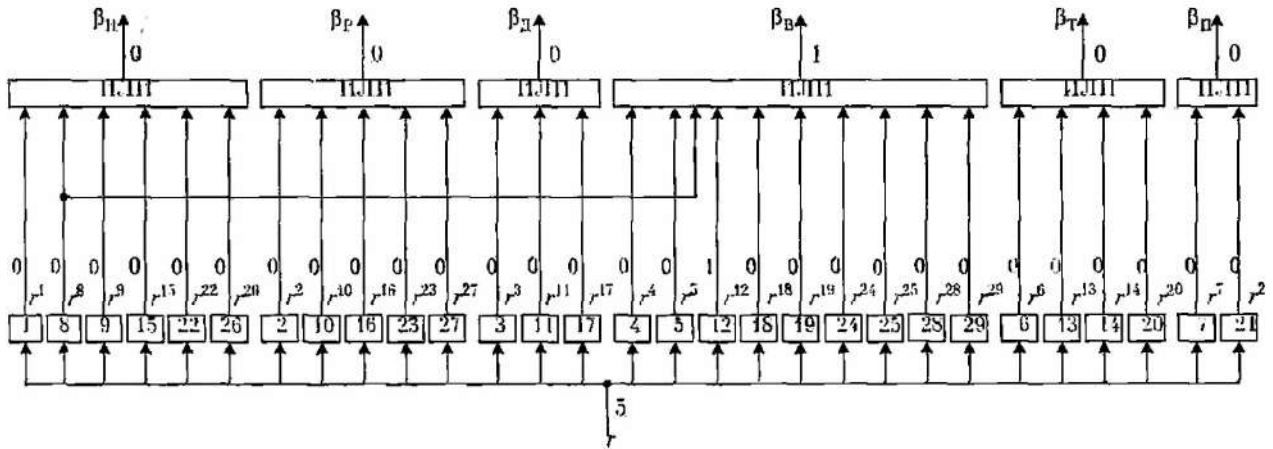


Рис. 4

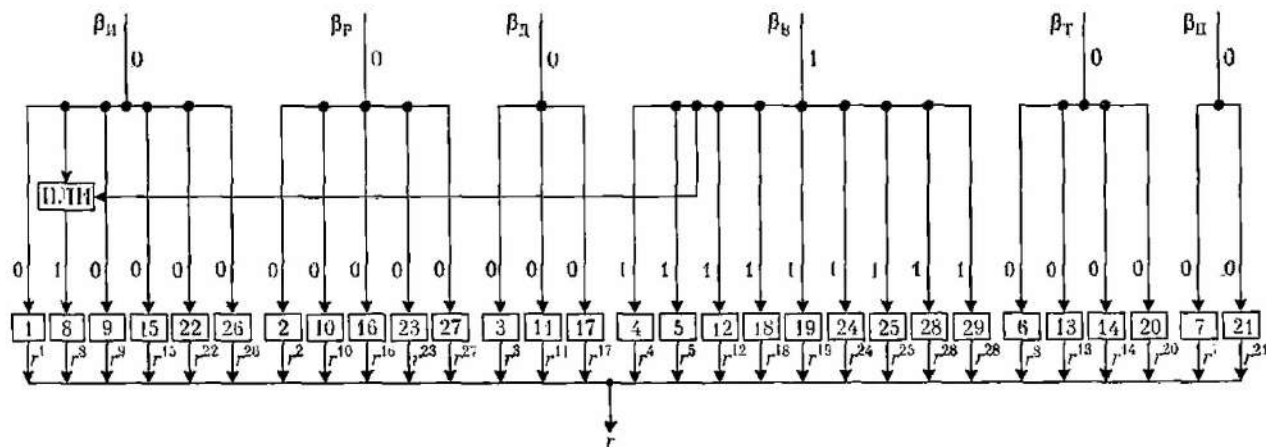


Рис. 5

**5. Схемная реализация бинарных логических сетей**

Рассмотрим вопрос о схемной реализации бинарных логических сетей на конкретном примере. Возьмем предикат  $P_3$ , связывающий тип влияния контекста  $r$  и падеж формы слова  $x_3$  из моделей склонения регулярных имен существительных. Построим отображение  $f(r) = x_3, M = \{1, 2, \dots, 29\}, N = \{И, Р, Д, В, Т, П\}$ :

$$\begin{aligned} \beta_{И} &= r^1 \vee r^8 \vee r^9 \vee r^{15} \vee r^{22} \vee r^{26}; \\ \beta_{Р} &= r^2 \vee r^{10} \vee r^{16} \vee r^{23} \vee r^{27}; \\ \beta_{Д} &= r^3 \vee r^{11} \vee r^{17}; \\ \beta_{В} &= r^4 \vee r^5 \vee r^8 \vee r^{12} \vee r^{18} \vee r^{19} \vee r^{24} \vee \\ &\quad \vee r^{25} \vee r^{28} \vee r^{29}; \\ \beta_{Т} &= r^6 \vee r^{13} \vee r^{14} \vee r^{20}; \\ \beta_{П} &= r^7 \vee r^{21}. \end{aligned} \quad (3)$$

Схема, реализующая отображение (3), представлена на рис. 4.

Схема находит полный образ предмета. Пусть, например,  $r = 5$ . Тогда  $\beta_{И} = 0, \beta_{Р} = 0, \beta_{Д} = 0, \beta_{В} = 1, \beta_{Т} = 0, \beta_{П} = 0$ . Полным образом предмета 5 является  $x_3 \in \{В\}$ .

Для нахождения прообраза предмета необходимо строить схему, реализующую отображение, обратное заданному, то есть схему, действующую в обратном направлении (рис. 5).

Схема находит полный прообраз предмета. Пусть, например,  $x_3 = В$ , тогда  $\beta_{И} = 0, \beta_{Р} = 0, \beta_{Д} = 0, \beta_{В} = 1, \beta_{Т} = 0, \beta_{П} = 0; r \in \{4, 5, 8, 12, 18, 19, 24, 25, 28, 29\}$ .

Построим схему, которая находит образ множества предметов относительно отображения (3) (рис. 6).

Математически эта переключательная цепь описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} \beta_{И} &= \alpha_1 \vee \alpha_8 \vee \alpha_9 \vee \alpha_{15} \vee \alpha_{22} \vee \alpha_{26}; \\ \beta_{Р} &= \alpha_2 \vee \alpha_{10} \vee \alpha_{16} \vee \alpha_{23} \vee \alpha_{27}; \\ \beta_{Д} &= \alpha_3 \vee \alpha_{11} \vee \alpha_{17}; \\ \beta_{В} &= \alpha_4 \vee \alpha_5 \vee \alpha_8 \vee \alpha_{12} \vee \alpha_{18} \vee \alpha_{19} \vee \alpha_{24} \vee \\ &\quad \vee \alpha_{25} \vee \alpha_{28} \vee \alpha_{29}; \\ \beta_{Т} &= \alpha_6 \vee \alpha_{13} \vee \alpha_{14} \vee \alpha_{20}; \\ \beta_{П} &= \alpha_7 \vee \alpha_{21}. \end{aligned} \quad (4)$$

Найдем образ какого-нибудь множества для отображения (4), воспользовавшись схемой на рис. 5. Возьмем, например, следующее множество типов влияний контекста  $r \in \{2, 5, 9, 24\}$ , которые соответствуют окончаниям  $a, я$  имен существительных.

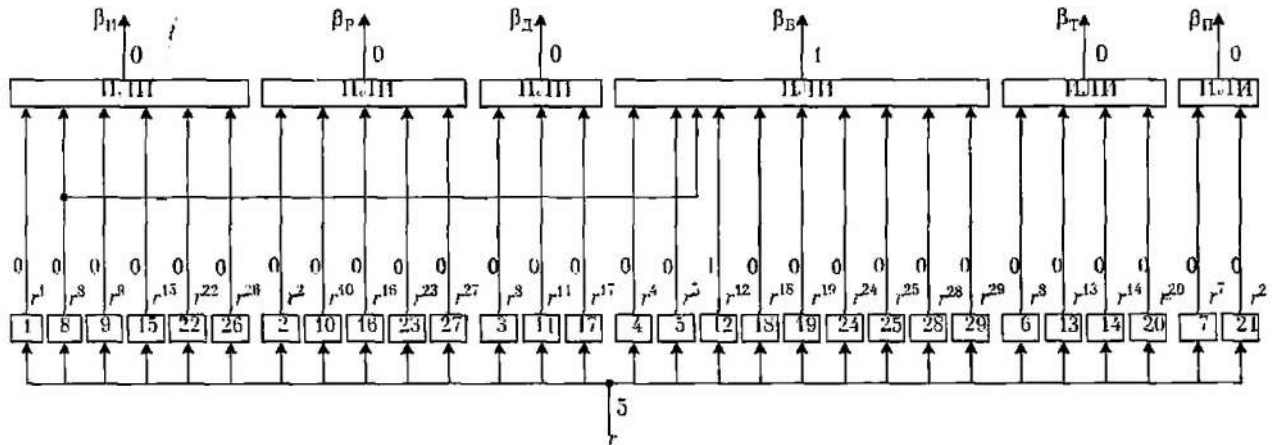


Рис. 4

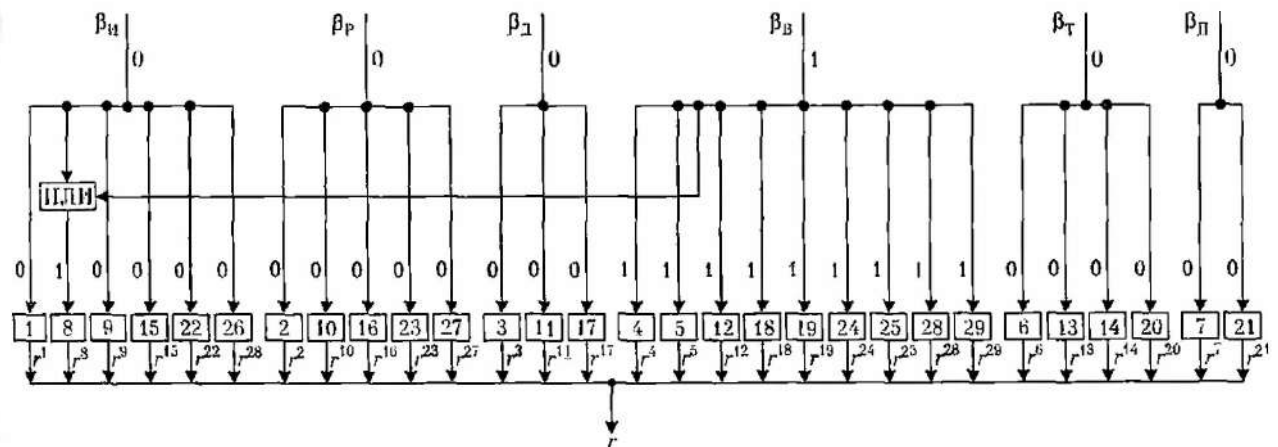


Рис. 5

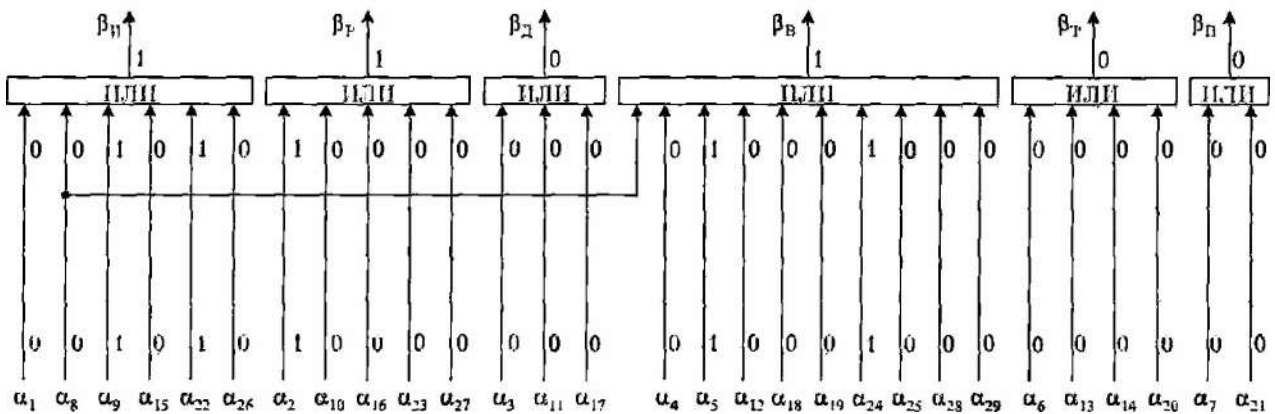


Рис. 6

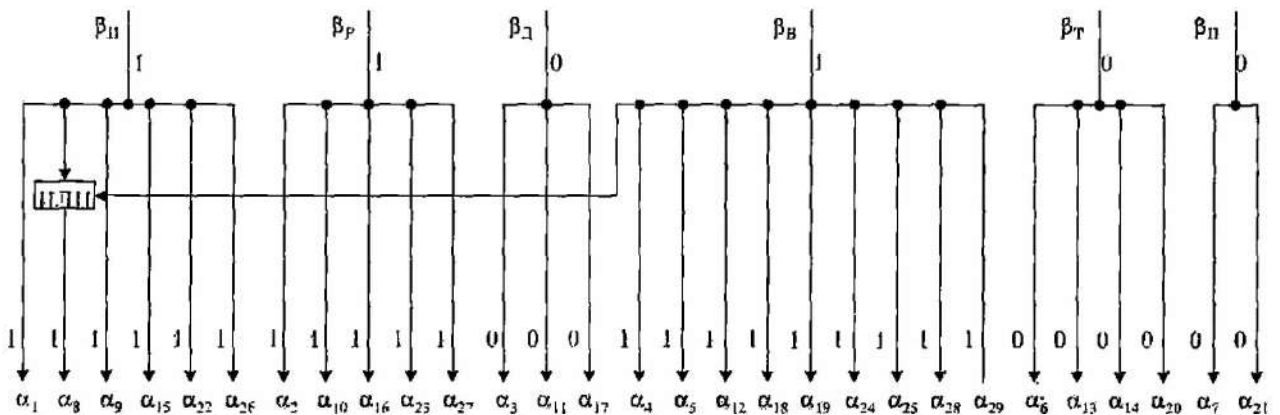


Рис. 7

Схема порождает множество возможных падежей:  $\{2, 5, 9, 24\} \rightarrow \{П, Р, В\}$ .

Для нахождения прообраза множества относительно заданного отображения (4) строится схема, действующая в обратном направлении (рис. 7).

Найдем прообраз какого-нибудь множества для отображения (4), воспользовавшись схемой на рис. 6. Возьмем, например,  $x_3 \in \{П, Р, В\}$ , тогда  $\beta_{11} = 1, \beta_P = 1, \beta_D = 0, \beta_B = 1, \beta_T = 0, \beta_П = 0$ . Схема порождает множество возможных типов влияния контакта  $r \in \{1, 2, 4, 5, 8, 9, 10, 12, 15, 16, 18, 19, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 27, 29\}$ .

### 6. Выводы

В заключение отметим, что каждая модель бинарной логической сети характеризуется своим предикатом модели, однако предикаты лишь описывают конкретную модель, а для того, чтобы сеть функционировала, т. е. чтобы из нее можно было бы извлечь некоторые знания, необходимо решать систему логических уравнений. Для решения логических уравнений в логических сетях используют линейные логические операторы. На продемонстрированных в данной работе примерах базируются метод функционирования бинарных логических сетей и метод их схемной реализации. Предлагается перейти от создания частичных типов (отдельных модулей)  $k$ -знач-

ных структур для задач ИИ к единой модели в виде бинарной логической сети, которая путем настроек (но не изменения структуры сети) обеспечит воспроизведение интеллектуальных свойств и функциональных преобразований.

Список литературы: 1. Бондаренко М. Ф., Шабанов-Кушнарченко Ю. П. Об алгебре предикатов // Вспоника интеллекта. — 2004. — № 1(61). — С. 15–26. 2. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. Теория интеллекта. Математические средства. — Х.: Вып. школа. 1984. — 144 с. 3. Бондаренко М. Ф., Дударь З. В., Ефимова И. А. и др. О мозгоподобных ЭИМ // Радиоэлектроника и информатика. — 2004. — № 2. — С. 89–105. 4. Bondarenko M. F., Dudar Z. I. About «Similar-To-Brain» Computers // Proc. of East-West Design & Test Workshop (Ukraine). — 2004. — P. 251–256. 5. Ефимова И. А., Лещинский В. А. Моделирование механизмов естественного языка с помощью бинарных логических сетей // Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. Тематич. вып.: Новые решения в современных технологиях. — 2005. — № 57. — С. 3–10. 6. Вещирская И. Д., Дударь З. В., Иванцов А. А., Лещинский В. А. Линейные логические операторы в виде схем и графов // Вспоника интеллекта. — 2004. — № 1(61). — С. 38–41. 7. Лещинский В. А. Алгебра предикатных операций в моделях бинарных логических сетей // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2005. — № 5. — С. 110–113.

Поступила в редакцию 07.09.2006

УДК 681.518:004:912

А. Л. Ерохин

## О ВИЗУАЛЬНОМ КОДИРОВАНИИ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ КОГНИТИВНЫХ ФУНКЦИЙ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА.

### Сообщение 1

#### 1. Введение

В статье рассматривается задача моделирования и адаптации психофизиологических состояний человека-оператора как одного из важных компонентов системы управления сложной системой. Проблема наглядно-образного (визуального) мышления остается весьма актуальной, поэтому использование визуальных систем кодирования информации, с позиций современных систем и средств искусственного интеллекта, является одним из важных направлений. Задача идентификации и оценки психофизиологического состояния (ПФС) человека, несмотря на то, что к ней интерес к ней приходился на 90-е годы, так и не решена. В настоящее время на новом этапе развития человеко-машинных систем, связанном с достижениями интеллектуализации техники и технологии, вновь усиливается интерес к этой проблеме.

#### 2. Исследования систем психофизиологических состояний человека-оператора

В существующих технических системах психофизиологическое состояние человека-оператора рассматривается как некий фон (постоянная величина), на котором решается задача управления объектом. На самом же деле функциональное состояние человека оператора следует рассматривать как фундамент, на котором разворачиваются психические процессы (процессы приема, переработки информации, принятия решений и формирования управляющих воздействий) [1–3]. Недостатком такого подхода является то, что попытки идентификации функционального состояния человека-оператора с помощью так называемых объективных показателей (например, биофизических, биохимических индикаторов) показали, что эти индикаторы не всегда адекватны целям исследования ПФС. С другой стороны, в современных СС функции человека-оператора сильно изменились и приобрели новые черты, связанные с сенсомоторными функциями (преимущественно работа не с тумблерами и крупногабаритными коммутационными элементами, а с манипулятором «мышь» и клавиатурой).

Для человека-оператора можно выделить несколько причин перехода ПФС из устойчивого состояния в неустойчивое:

- несоответствие между психологическим статусом (психологическим портретом) человека-оператора и его профессиональной деятельностью;

- неопределенность информационного состояния человека-оператора;
- снижение когнитивных (базовых операторских) функций человека-оператора в поле влияния стрессора.

Неопределенность информационных состояний человека-оператора является объективной причиной, которая может быть минимизирована при усовершенствовании методов распознавания самой СС. Причиной снижения когнитивных функций человека-оператора являются влияния стрессоров, которые вызывают развитие стресса монотонии у операторов [3]. Однако сама постановка задачи минимизации сталкивается с более сложными психофизиологическими процессами, определяемыми не только множественностью факторов изменения ПФС, но и необратимостью процессов в биосистемах.

Для решения задачи минимизации перехода ПФС человека-оператора в неустойчивое состояние необходимо разработать модель взаимодействия формализованной квазистойчивой системы ПФС и внешних воздействий.

В этой связи представляется важной задача идентификации ПФС с точки зрения базовых операторских функций. Цель такой идентификации — создание адекватной модели ПФС человека-оператора, пригодной для практической реализации с помощью современных информационных технологий.

Повышение качества операторской работы лица, принимающего решения, определяет необходимость активизации его базовых когнитивных психологических функций.

Рассмотрим современные понятия, касающиеся моделей работы мозга [4–6]. Важнейшей частью мозга человека является так называемая ретикулярная формация (РФ) — скопление нервных клеток, переплетающихся между собой в сложную сеть. Фактически она представляет собой информационную сеть. Первая часть РФ, возбуждаясь, действует как активатор для всех вышележащих 14–15 млрд нервных клеток коры головного мозга. Вторая часть РФ — активатор только для отдельных участков коры. В коре пересекаются сигналы, быстро (за 9 мс) проходящие путь от внешних органов чувств до клеток коры, а несколько позже (через 30–40 мс) в те же клетки коры поступают импульсы, идущие от РФ.

Ритмы электрической активности мозга

Название ритма	Частота, колеб./с	Амплитуда, мкВ	Описание
Дельта-ритм	0,5-4	50-500	Медленный ритм. Охраняет жизнеспособность мозга. При появлении раздражителей, грозящих серьезными нарушениями работы мозга, медленные ритмы переводят нейроны в режим холостого хода
Тета-ритм	5-7	10-30	Вызывает прекращение ощущения удовольствия
Альфа-ритм	8-13	До 100	Связан с образом, возникающим в мозге
Сигма-ритм	13-14		Точно не установлено
Бета-ритм	15-35	5-30	Связан с состоянием напряжения, беспокойства
Гамма-ритм	35-100	До 15	Точно не установлено
Сверхмедленные колебания	7-8 0,5-2 1-8 в мин. в мин.	0,3-0,8 0,5-1,5	Фоновая активность нейронов

В коре происходит анализ, синтез и обработка поступившей информации согласно законам высшей нервной деятельности, сформулированным в трудах И. П. Павлова. Считается, что мозг способен накопить и сохранить  $10^{15}$ – $10^{16}$  бит информации [7, 8]. В табл. 1 приведена классификация электрической активности мозга. Рассмотрим, например, как физиология описывает особенности наркоза и сна мозга. Наркоз рассматривается не как торможение либо угасание активности, которое «разливается» по коре и спускается на подкорковые структуры, а наоборот — как увеличение активности, гиперактивация. Тогда малейший внешний раздражитель сразу приводит к перегрузке и защитному отключению. Такой режим называется режимом синхронизации. Соврассматривается как появление медленных, но высокоамплитудных колебаний. Режим десинхронизации — это реакция депрессии относительно медленных колебаний типа альфа-ритма и смена их высокочастотными, но низкоамплитудными колебаниями, то есть это реакция пробуждения, активации. Эта реакция во многом зависит от деятельности РФ. Н. Винер в [9] сформулировал свою знаменитую гипотезу о механизме сканирования в мозге, основанную на результатах анализа колебаний энцефалограммы человека. Как известно, он построил спектр и обратил внимание на резкое падение мощности колебаний в районе 9,05 Гц. Современные исследования активности мозга человека проводятся Институтом мозга РАН на основе данных различных сканеров и томографов.

Из всего множества подходов к моделированию интеллекта (а по сути — работы мозга) в настоящее время выделились два конкурирующих подхода: 1) структурный подход (например, нейросети, мозгоподобные ЭВМ); 2) функциональный подход («черный ящик» с различными функциями обработки информации).

Анализ ритмов активности мозга (табл. 1) дает основание полагать, что истина в проблеме моделирования интеллекта, как всегда, лежит где-то посередине.

Критики модели мозга в виде вычислительной машины апеллируют к данным о производительности мозга, например, при распознавании визуального образа, предъявляемого человеку. Так, человек узнает (распознает) образы, если частота предъявления не превышает в среднем 9 Гц. Если перевести это утверждение на язык цифровых ЭВМ, то это свидетельствует о том, что «внешняя» частота работы мозга — примерно 9 Гц, а отнюдь не «мегагерцы», как принято считать в настоящее время. Тогда за счет чего же достигается такая колоссальная производительность мозга при решении

задач распознавания? Ответом может быть только огромная разрядность «машинного слова» мозга при решении указанных задач. Можно высказать предположение, что вся нейронная сетевая структура мозга является не только (а может, и не столько) решателем, а скорее «разрядной сеткой». Отсюда напрашивается вывод о непригодности существующих фон-неймановских ЭВМ последовательного действия для адекватного и эффективного моделирования интеллекта и необходимости искать новые подходы к аппаратному обеспечению. Одним из таких «новых» (хорошо забытых старых) подходов может стать аналоговое моделирование.

Н. Винер также предположил, что мозг обладает механизмом стробирования (временной селекции), то есть реакция мозга (прием, обработка сигналов) осуществляется только в определенные временные промежутки. На основе этого и была высказана гипотеза о дискретном характере работы мозга.

Считается [9], что механизм стробирования в мозге связан с тем, что в нейроне возбуждение или торможение должно происходить благодаря комбинации импульсов в определенный отрезок времени. Стробирующий механизм позволяет комбинировать сообщения.

Теперь рассмотрим работу зрительного анализатора человека. В зрительном нерве примерно 1 млн волокон, рефлекторный период равен 10 мс. Зрительный канал может передать  $10^6$  сигналов за 10 мс.

Если бы каждый из этих сигналов регистрировался отдельным нейроном, то через 100 с уже все клетки коры были бы заняты.

Таким образом, по пути к мозгу происходит предварительная обработка, сжатие, перекодировка, селекция информации. По предположению Н. Винера, для этого используется альфа-ритм. Согласно результатам опытов Калифорнийского университета, центральная нервная система может воспринимать зрительные раздражения каждые 0,1 с. Тогда упрощенный механизм обработки внешних сигналов мозгом таков. Сигналы внешнего мира, поступаая в органы чувств, кодируются в с помощью электрических импульсов в течение 9 мс передаются по нервным проводникам через подкорковые образования в кору. В подкорковых образованиях происходит предварительная обработка информации: в глубине мозга сигналы попадают в РФ, откуда через 30–40 мс поступают в кору. В коре происходит анализ и синтез. При этом именно РФ оказывает дополнительное влияние на кору, мобилизуя активность того или иного отдела мозга. Таким образом, РФ выполняет регулирующую, управляющую функцию.

В кибернетике мощность системы как регулятора не может превосходить пропускную способность ее как канала связи. РФ — это интеллектуальный канал связи. На основании того, что РФ пропускает значительно меньшую частоту импульсов, обладает меньшей функциональной подвижностью, то есть меньшей лабильностью, физиологи утверждают, что кора обладает свойством саморегуляции, то есть имеет систему обратных связей.

На основе указанных механизмов стало возможным рассматривать семь принципов работы мозга как моделирующей установки [7, 8]:

1) *принцип этапности*. Образование моделей происходит в результате перекодирования информации из низшего кода в высший, причем по вероятностному принципу (вероятностное перекодирование);

2) *принцип активного изоморфизма*. Образованные модели происходят по законам изоморфного отображения. Процесс сличения (установления меры сходства, идентификации);

3) *принцип компарации*. Образование новых моделей происходит при сравнении врожденных или приобретенных в ходе индивидуального развития моделей со вновь возникающими при поступлении сигналов в мозг;

4) *принцип функционального кольца*. Моделирование происходит в определенном материальном субстрате — нервных структурах. Этот процесс не однонаправленный (рецептор — кора). Моделирование — это результат циркуляции по кольцу: центр — периферия — кора — подкорковые образования;

5) *принцип энтропийности*. Создание моделей в мозге ведет к уменьшению энтропии;

6) *принцип вероятностного прогнозирования*. Наличие обратной связи — канала, по которому в мозг поступают сигналы о том, что делается на периферии, — имеет смысл тогда, когда в мозгу происходит сравнение того, что сделано, и того, что должно быть в результате действия;

7) *принцип минимизации отрицательного*. Организм избирает такую тактику, которая сулит ему удовлетворение жизненных потребностей и позволяет избежать неблагоприятных ситуаций и отрицательных эмоций. В терминах системного анализа этот принцип формулируется как получение максимума выигрыша при минимальных затратах.

Согласно И. М. Гельфанду, В. С. Гурфинкелю и М. Л. Цейтлингу [2], нервные центры работают по принципу наименьшего взаимодействия: задача системы для каждой внешней ситуации состоит в том, чтобы поступающая сигнализация была минимальна.

Рассмотренные принципы будем использовать при моделировании базовых когнитивных функций человека-оператора при выполнении им операторских функций во время стрессорных воздействий. Основной целью функционирования оператора является обеспечение выполнения им своих основных операторских функций в течение заданного времени (времени дежурства) на заданном уровне, независимо от внешних проявлений негативных факторов. Поэтому важной задачей является совершенствование самих интерфейсов «человек-машина» путем интеграции в систему специальных устройств, обеспечивающих регуляцию ПФС человека-оператора на заданном уровне. Для построения такой модели вначале необходимо решить задачу формальной идентификации ПФС человека-оператора.

### 3. Разработка моделей идентификации систем психофизиологических состояний человека-оператора

Существует несколько подходов к разработке модели человека-оператора в СС. Первый подход предполагает исследование системы ПФС человека-оператора, формализацию такой системы путем построения множества допустимых интегральных коэффициентов влияния

$$\psi = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}, \quad (1)$$

где  $k_i$  — интегральный коэффициент, учитывающий одно ПФС;  $n$  — количество ПФС человека-оператора.

Интегральный коэффициент  $k$  составляется с учетом предметной области, поскольку для разного рода деятельности человека-оператора могут быть важными те или другие параметры, составляющие общее ПФС. Например, для диспетчера аэропорта

важнейшим параметром ПФС считается скорость реакции зрительного и слухового анализатора. Для диспетчера электроэнергетической системы наиболее важным параметром ПФС можно считать не скорость реакции, а рассеянное внимание, поскольку ему приходится наблюдать за информационными экранами с большим количеством информационных точек.

На протяжении одного сеанса работы (рабочей смены, боевого дежурства и т. п.) человек-оператор изменяет свое ПФС. Если вести периодический контроль за ПФС, то можно идентифицировать и текущее ПФС. Тогда идентификация текущего или мгновенного значения ПФС будет сводиться к выбору такого  $k_i$ , который наиболее близок к интегральному коэффициенту ПФС и согласуется с заданной функцией принадлежности. Остается установить характер зависимости между частотой контроля за ПФС и качеством принятого решения (уровень согласованности решения со среднестатистическим решением для данного события в системе). Такая модель является в значительной степени эмпирической и требует постоянной коррекции коэффициентов при ее применении в режиме реального времени. Коррекцию можно проводить на следующих этапах:

1) первичное настраивание модели системы ПФС. Проводится путем входного тестирования человека-оператора перед началом сеанса работы. На этом этапе строится система ПФС и проверяется степень совпадения с предыдущими системами ПФС для данного человека-оператора. Входной тест может использоваться как тренинг человека-оператора, а также как допуск к работе;

2) периодическое подстраивание модели системы ПФС для идентификации текущего значения ПФС. Осуществляется путем выбора коэффициента из построенного на первом этапе множества.

В работе человека-оператора присутствует ряд факторов, вызывающих нервно-психическое напряжение. В первую очередь, можно выделить такие стрессорные факторы, как ответственность за выполнение технической задачи по недопущению аварийной ситуации в системе, длительное воздействие монотонии и дефицит времени, необходимого для принятия решений, адекватных сложившейся ситуации. Результатами таких стрессорных нагрузок является снижение психологической и физической работоспособности. Исследования динамики психоэмоционального состояния специалистов, работающих в условиях, приближенных к экстремальным, проводились с помощью психологических и психофизиологических методик [3]. Базовыми психологическими методиками исследований являются: методика оценки скорости сенсомоторной реак-

ции — ВЗМР; методика оценки эмоциональной напряженности на основе измерения уровня электрокожного сопротивления — ЭКС; восьмицветный тест Люшера для определения степени суммарного отклонения от аутогенной нормы психического дискомфорта и напряженности, а также расчета вегетативного коэффициента [10]; методика диагностики САН («самочувствие, активность, настроение»); методика реактивной тревожности, для определения ее уровня как ситуационного состояния, развивающегося на фоне монотонии и утомления.

Данные фоновых исследований [3] корреляционных матриц психологических показателей сотрудников Чернобыльской АЭС и результаты факторного анализа матриц корреляций до и после оперативного дежурства приведены в табл. 2. Факторный анализ матриц корреляций диагностических показателей показал, что в фоновом обследовании выявлены 7 значимых факторов, объединяющих 85 % дисперсий корреляционной матрицы. 24 % дисперсий коррелируют с показателями психоэмоционального и функционального состояния испытуемых, а также с их возрастом и стажем работы. Этот

Таблица 2

Данные фоновых исследований психологических показателей

Методика	Психологический показатель	Фон		После работы		t-критерий Стьюдента
		n	s	n	s	
ВЗМР	Время реакции, мс	288	98	314	69	1.06
САН	Самочувствие	5,1	1,1	4,1	1,2	3,01
	Активность	1,6	1,1	4,2	1,1	1,26
	Настроение	4,8	0,9	4,4	1,2	1,31
Тест Люшера	Суммарное отклонение	16,2	5,1	14	6,2	1,18
	Вегетативный коэффициент	1,0	0,7	1,4	0,8	1,84
ЭКС	Электрокожное сопротивление, кОм	17,6	5,9	15	6,4	1,41

Таблица 3

Факторный анализ матриц корреляций диагностических показателей

Методика	Показатели	24% дисперсий	16% дисперсий	12% дисперсий
ВЗМР	Время реакции, мс	-0,142	0,109	-0,116
САН	Самочувствие	0,227	0,437	-0,274
	Активность	0,257	0,352	-0,253
	Настроение	0,188	0,449	-0,244
Тест Люшера	Суммарное отклонение	-0,416	0,083	0,080
	Вегетативный коэффициент	0,303	-0,135	0,138
ЭКС	Электрокожное сопротивление, кОм	0,258	0,129	0,216

**Структура факторов  
исследуемых психофункциональных состояний  
испытуемых после суточного дежурства**

Методика	Показателя	18% дисперсий	16,1% дисперсий	14,2% дисперсий
ВЗМР	Время реакции, мс	-0,140	0,203	-0,353
САН	Самочувствие	0,430	-0,139	-0,097
	Активность	0,274	-0,007	-0,288
	Настроение	0,429	-0,006	-0,166
Тест Люшера	Суммарное отклонение	0,005	-0,108	0,040
	Вегетативный коэффициент	-0,225	0,109	0,077
ЭКС	Электрокожное сопротивление, кОм	-0,082	0,169	-0,337

фактор приведен в табл. 3 и является показателем состояния испытуемых, сочетающее «психический дискомфорт, чувство страха и повышенную эмоциональную напряженность» [3]. Второй фактор, объединяющий 16 % дисперсий корреляционной матрицы, определяет «плохое самочувствие и настроенно, подавленность» [3].

Третий фактор, 12 % дисперсий, определен как высокий уровень активации симпатического отдела вегетативной нервной системы оператора. Другая структура факторов исследуемых психофункциональных состояний испытуемых получена после суточного дежурства (табл. 4). Все приведенные данные получены при обследовании сотрудников Чернобыльской АЭС, деятельность которых проводилась в условиях, максимально приближенных к экстремальным [3]. Полученные значимые корреляционные связи индивидуально-психологических характеристик с изменением показателей психофункциональных состояний обследованных свидетельствуют об их прогностичности.

Уравнение модели для прогнозирования интенсивности реагирования операторов на возникновение экстремальной (нештатной, предаварийной или аварийной) ситуации, выведенное эмпирически [3], имеет вид:

$$Y = (0,6X_1 + 0,6X_2 + 0,2X_3 + 0,1X_4 + 0,1X_5) + 2,4, \quad (2)$$

где  $X_1$  — желание работать;  $X_2$  — удовлетворенность психологическим климатом в коллективе;  $X_3$  — эмоциональная напряженность;  $X_4$  — психоэмоциональная устойчивость;  $X_5$  — показатель правосторонней функциональной асимметрии мозга.

Наиболее важными психологическими функциями человека-оператора являются когнитивные функции внимания, на которые оказывают сильное влияние посторонние стрессоры, прежде всего — стресс монотонии [3, 5, 11].

В современных системах слабо проявляются те психофизиологические особенности, которые характерны для обычных эргатических систем, а именно в них не проявляется явно стресс монотонии. При попытке получить адекватную модель ПФС возникают сложности, связанные с неоднозначным толкованием психофизиологами и специалистами по инженерной психологии стресса монотонии. Поскольку полярной стрессу монотонии можно считать функцию внимания [3], то собственно моделирование функции внимания также является важным и более соответствует основным когнитивным реакциям человека-оператора. Это связано с уменьшением чрезмерности визуальной информации, которая подлежит анализу последовательными механизмами обработки.

Реализация формализованной модели когнитивной функции внимания необходима системе искусственного интеллекта (СИИ) для прогноза нестандартных или аварийных ситуаций, локализованных в актуальном зрительном поле системы.

Использование модели психофизиологического состояния человека-оператора позволяет решить важную научно-практическую задачу — создание методики психологической реабилитация человека-оператора, что позволит снизить вероятность принятия неадекватного решения.

В процессе анализа операторской деятельности принято выделять следующие группы психических функциональных состояний [11]:

1) стресс (напряженность), например, стресс монотонии у операторов, который приводит к резкому снижению реактивных функций вплоть до полного отказа ПФС человека-оператора. Предъявление мелькающего с одинаковой частотой изображения человеку-оператору (фактически — навязывание коре головного мозга внешних ритмов) приводит к тому, что в заинтересованных структурах головного мозга выстраиваются цепочки ассоциаций. Через некоторое время после начала показа такого типа изображений фронтальная часть зрительного анализатора оказывается неспособной зарегистрировать изменения (срабатывают защитные функции коры головного мозга, предохраняющие мозг от разрушения). Единственный способ дать мозгу информацию об изменениях изображения — воздействовать на периферическую часть зрительного анализатора человека-оператора, которая остается временно активной. Однако современные дисплеи не обладают функцией воздействия на периферическое зрение, а следовательно, априори только усиливают стресс монотонии у операторов. Поэтому, основываясь на исследованиях модели ПФС человека-оператора,

можно сделать вывод о том, что актуальной становится задача разработки специальных методов, алгоритмов и устройств для создания дисплеев нового поколения, устраняющих указанные недостатки традиционного способа предъявления зрительной информации;

2) утомление;

3) эмоциональные состояния человека-оператора.

Современная модель ПФС человека-оператора должна максимально учитывать все эти три составляющие. ПФС можно рассматривать как реакцию на внешние или внутренние возмущения, которые изменяют характеристики психической системы человека-оператора и организма в целом.

Основной эмпирический материал, полученный при исследовании ПФС, позволяет прежде всего ввести анализ изменений состояний человека-оператора. Начало системы отсчета при проведении таких практических исследований — состояние покоя человека-оператора. Тогда остается фиксировать только флуктуации ПФС по трем параметрам функциональных состояний (стресс, утомление, эмоции). Сложнее всего регистрировать третью составляющую.

Важной для практического использования является принципиальная возможность повторения состояний человека-оператора. ПФС, как класс психических явлений [12–14], являются не только ограниченно длящимися во времени, но потенциально многократно достижимыми.

#### 4. Разработка методики и модель исследования ПФС

Для построения эффективной модели ПФС человека-оператора предлагается следующий алгоритм исследования ПФС для конечного множества операторских задач:

1) эмпирическое исследование всех возможных ПФС человека-оператора. Субъекту предъявляются выборки различных ситуаций;

2) выбор репрезентативной выборки субъектов-ПФС. Начальные предположения и ограничения: предполагается, что в этой выборке удастся реализовать все возможные ПФС для множества операторских задач из заданной предметной области;

3) подход к естественной метрике состояний согласно (2). Отнесение каждого из состояний человека-оператора ко множеству всех ПФС. Поиск  $i$ -го ПФС в множестве  $n$ ;

4) если ПФС не найден, то возврат к пункту 2 и выдвижение нового предположения о выборке субъектов-ПФС;

5) иначе — ПФС идентифицирован.

Данный подход является стохастическим, поскольку эргодическая теория здесь не работает даже для сколь угодно малых выборок субъектов и малого

количества операторских задач. Используя предложенную методику исследования, принципиально возможно построить модели стабилизации когнитивных функций человека-оператора и доказать, что изменение ПФС принципиально обратимо.

#### 5. Разработка метода адаптации когнитивных функций человека-оператора к воздействию стрессоров

Рассмотрим вопросы стабилизации когнитивных функций лица, принимающего решение, находящегося в поле воздействия стрессоров. Для этого предлагаются две адаптационные модели, позволяющие улучшить качество управления интеллектуальной системой и принятия решений.

Психические процессы человека — это сложные процессы, образующие иерархическую открытую систему, динамически изменяющую свои состояния под воздействием внешних (экзогенных) и внутренних (эндогенных) факторов [15]. Изменение этих факторов носит случайный характер, поэтому смена психических состояний может быть представлена последовательностью переходных состояний, у которых каждое последующее состояние зависит от предыдущего. Большой интерес представляют так называемые пограничные состояния, возникающие у человека, например, при длительном и постоянном воздействии стрессоров или при хронических заболеваниях. Структура-аттрактор, называемая в биологии и медицине системой гомеостатического регулирования [15], при пограничных состояниях нередко оказывается перед выбором нового пути развития системы в точке, далекой от устойчивого равновесного состояния. В медицине такое состояние регулирования жизненных функций называется гетеростазом, означая, что обычных параметров регулирования недостаточно и необходимо посредством лекарств или любых иных воздействий расширить диапазон регулирования.

Процесс восстановления психических состояний называется процессом психологической реабилитации. 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» [16]. Однако указанная сложность устраняется применением принципа тождественности, предложенного в [16]. Указанный принцип определяет тождественность природы физических процессов-носителей субъективных состояний и природы самих субъективных состояний. Это дает возможность разработать модели сложно организованных совокупностей физических параметров в виде стохастических, марковских процессов, при воздействии которых на

субъект возможен управляемый процесс перехода одного психического состояния в другое.

Наиболее разработанными параметрами воздействия могут считаться воздействия цветовых полей (цветовых последовательностей). Четко определенные эмпирические границы «цветового символизма» дают возможность широко применять цвет для тестирования, профилактики и лечения психологических отклонений.

Однако ни одна из методик цветового воздействия не учитывает того факта, что центральная нервная система быстро отфильтровывает длительно повторяющиеся стимулы, выводя их из поля внимания, а значит, эффективность таких воздействий из-за монотонии резко снижается. Альтернативой могут быть только динамически изменяемые, стохастические процессы, близкие по структуре к марковским процессам, при воздействии которых на субъект возможен управляемый процесс перехода одного психического состояния в другое, характеризующийся изменением окраски и силы эмоциональных переживаний. Эмоции опосредованно воздействуют на физиологическое состояние человека и дают возможность объективной оценки изменения психического состояния.

Моделирование такого класса стохастических процессов возможно при использовании аппарата комбинаторных и топологических преобразований информации [17, 18]. Определенным достоинством такого способа моделирования является дискретность растровых структур входа-выхода системы кодирования, дающая возможность моделирования разнообразных топологических структур одного класса эквивалентности, а использование комбинаторной нерегулярности обеспечивает моделируемому процессу любой тип распределения дискретных элементов кодирования.

Основу математического и физического моделирования составляют дискретные элементы, преобразующие входное и выходное изображения в набор регулярных и нерегулярных фрагментов, соответственно образующих матричные структуры  $A$  (входа) и  $B$  (выхода). Преобразование двумерной информации  $F$  осуществляется тем, что между структурами  $A$  и  $B$  устанавливаются отношения взаимного положения, которые являются взаимно-однозначными.

Эти отношения упрощаются с использованием предиката совпадения координат положения одноименных элементов растров, преобразуя сложную таблицу отношений в матрицу  $A1$ , состоящую из нулевых и единичных элементов. При этом указанная матрица является инвариантом к системе кодирования при аффинных преобразованиях. Расположения «1» и «0» в матрице  $A1$  могут быть организованы

в структуры, которые являются топологически конформными друг другу.

Благодаря комбинаторной нерегулярности и соорганизованности дискретных элементов преобразования достигается уникальная возможность моделирования многообразных квазистойчивых процессов при использовании одной базовой матрицы  $A1$  кодирования при повороте ее системы координат вокруг какой-либо точки или при линейных перемещениях ее относительно первичной информации.

Проведено физическое моделирование процессов комбинаторного преобразования визуальной информации на основе специальных оптико-волоконных установок, которое обеспечивает визуальное представление о степени искажения первичной информации. Роль такой информации выполняют подвижные светофильтры, образующие упорядоченные информационные потоки с параметрами физического цвета, формы и размера. Если на время остановить движение светофильтров, то на приемной поверхности волоконно-оптического преобразователя сформируются несколько изображений. Они формируют упорядоченное эталонное множество  $\Omega_1$ , которое является по отношению к преобразованной семантике  $\Omega_2$  подсистемой.

После такого преобразования свойств на выходной поверхности волоконно-оптического преобразователя получим объединение неупорядоченных подмножеств разнокрапчатых абстрактных фигур, степень непохожести которых по сравнению с эталонным изображением определяется количеством искажений в тракте передачи. В каждый момент времени преобразованная семантика  $\Omega_2$  является объединением эквивалентных подмножеств  $\Omega_{2i}^{*k}$  и описывается выражением

$$\Omega_2 = \bigcup_{i=1}^N \Omega_{2i}^{*k|k=t}, \quad (3)$$

где  $k$  — количество подмножеств, заполняющих выходную поверхность системы;  $\Omega_{2i}^{*k}$  — подмножество, эквивалентное подмножеству

$$\Omega_1 = \bigcup_{i=1}^N \Omega_{1i}, \quad (4)$$

где  $N$  — максимальное число подмножеств на входной поверхности.

При неподвижном положении изображения на входе прямоугольная матрица значений коэффициента комбинаторных перестановок  $R_s$  определяет вероятность перехода состояния.

Таким образом, модель преобразования первичных изображений в динамике может рассматриваться как процесс, воспринимаемый оператором как случайный при неизменном положении системы в выбранной системе координат.

Наибольший интерес для моделирования представляет обратная задача распознавания искаженной информации при наличии эталонного первичного изображения и матрицы  $R_p$ .

### 6. Выводы

Разработаны методика и модель исследования психофизиологического состояния человека-оператора, являющегося составной частью системы искусственного интеллекта. Рассмотрены пути разработки метода адаптации когнитивных функций человека-оператора к воздействию стрессоров.

В следующем сообщении будет предложен метод воздействия на ПФС человека-оператора в виде экзогенного резонансного хронотопы, взаимодействующего с эндогенными системорегулирующими процессами в системе ПФС, а также изложено использование дветодинамических преобразователей изображений для визуального моделирования хаотических процессов, отображаемых на двумерных фазовых дискретных плоскостях, детерминированных коэффициентами нерегулярности и гомеоморфизмами, образующими группу устойчивых аттракторов.

Список литературы: 1. *Азутин В. М., Зингерман А. М., Кислицин М. М.* Комплексная оценка функционального состояния человека-оператора в системах управления // Проблемы космической биологии. — 1977. — Т. 34. — С. 134–137. 2. *Васильев Ю. М., Гельфинд П. М., Губерман Ш. А., Шик М. Л.* Взаимодействие в биологических системах // Природа. — 1969. — № 6. — С. 13–21; № 7. — С. 24–33. 3. Исследования и разработка рекомендаций по улучшению условий труда и совершенствованию профессиональной подготовки полярных ОАЭ и промышленности. Отчет о НИР / ВНИИПО МВД РФ: Рук. Марьян М. П. № ГР01900057262. — М., 1990. — 279 с. 4. *Поспелов Д. А.* Моделирование рассуждений. Опыт анализа мыслительных актов. — М.: Радио и связь, 1989. — 184 с. 5. *Прибрам К.* Язык мозга. — М.: Прогресс,

1975. — 453 с. 6. *Ruggieri V., Morelli J.* Chromatic perception in relation to an hypothesized cerebral dominance // *Percept and Mot. Skills.* — 1985. — Vol. 60. — P. 583–589. 7. *Кастри Дж.* Большие системы: связность, сложность и катастрофы. — М.: Мир, 1982. — 324 с. 8. *Клейд Э.* Анализ сложных систем. — М.: Сов. радио, 1969. — 360 с. 9. *Винер Н.* Кибернетика или управление и связь в животном и машине. — М.: Сов. радио, 1968. — 325 с. 10. *Семкин В. В.* Цветовой тест Люшера в задачах диагностики функционального состояния и работоспособности человека-оператора // Методики исследования и диагностики ФС и работоспособности человека-оператора в экстремальных условиях. — М., 1987. — С. 62–70. 11. *Селье Г.* Стресс без дистресса. — Рига: Виеда, 1992. — 109 с. 12. *Костин А. Н.* Принципы взаимного резервирования при распределении функций между человеком и автоматикой. Автореф. дис. ... д-ра психол. наук / Институт психологии РАН. — М., 2000. — 36 с. 13. *Забродин Ю. М.* Психология личности и управление человеческими ресурсами. — М.: Финстатинформ, 2002. — 360 с. 14. *Суворов Н. Б., Меницкий Д. Н., Булгакова О. С. и др.* Психофизиологическая подготовка оператора в биотехнической системе // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. — 2003. — Т. 2, № 1. — С. 4–12. 15. *Стрелков Ю. К.* Инженерная и профессиональная психология. — М.: Академия, 2001. — 360 с. 16. *Shepard R. N.* The perceptual organization of color: An adaptation to the regularities of the terrestrial world // *The adapted mind: Evaluator psychology and the generation of culture.* — New York: Oxford University Press, 1992. — P. 495–532. 17. *Ерохин А. Л., Бурцев Вал. Н., Бурцев Вл. Н.* Исследование стохастических процессов комбинаторно-топологического кодирования информации. Сообщение 1 // Радиоэлектроника и информатика. — 2000. — № 4(13). — С. 44–48. 18. *Ерохин А. Л., Бурцев Вал. Н., Бурцев Вл. Н.* Способ моделирования стохастических процессов с помощью топологических преобразований // Проблемы биологии. — 1999. — Вып. 51. — С. 151–157.

Поступила в редакцию 11.12.2006

УДК 621.397.331

В. А. Бобух, Н. В. Павлова

## РЕАЛИЗАЦИЯ НЕКОТОРЫХ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

### 1. Введение

В настоящее время телевизионные системы используются практически во всех отраслях науки и техники. Без телевидения немислмы освоение космоса, решение технологических задач и автоматизация многих производственных процессов, создание уникальных инструментов научного исследования, развитие радио- и гидролокации, создание реалистичных тренажеров для обучения летчиков и космонавтов и многое другое. В силу этого обстоятельства особую актуальность приобрели вопросы цифровой обработки видеoinформации. Существует множество зарубежных систем, однако для отечественного пользователя доступными являются в основном системы нелинейного монтажа. Главными их недостатками являются потеря качества информации при сжатии, необходимом для ее хранения, и существенно большее по сравнению с длительностью материала время монтажа. Указанных недостатков лишены системы, работающие в реальном времени. Такие системы выполняют две группы преобразований изображений: геометрические (изменение положения и формы) и колориметрические (изменение цветовых характеристик, задание способов взаимодействия нескольких изображений) преобразования. В Харьковском национальном университете радиоэлектроники ведутся государственные и договорные работы, связанные с созданием алгоритмов, методов и структур для цифровой обработки изображений в реальном времени. В рамках этих работ проведены исследования и предложены методы для реализации некоторых колориметрических преобразований изображений, которые будут рассмотрены в данной статье.

### 2. Анализ состояния вопроса

К колориметрическим преобразованиям изображений относят цветовую коррекцию, пастеризацию, соларизацию, раскраску в условные цвета, обесцвечивание, зональное, аддитивное и неаддитивное микширование, электронную пир-проецию. Рассмотрим реализацию цветовой коррекции и микширования изображений в системе обработки видеoinформации.

#### 2.1. Реализация цветовой коррекции изображений

Нередки случаи, когда по независимым от оператора обстоятельствам необходимо проводить съемку в быстро изменяющихся условиях освещенности и цветовой гаммы. При этом современные автоматически настраиваемые видеокамеры зачастую, несмотря на их высокую цену, дают резкое ухудшение качества изображения, проявляющееся в виде за-

ливки изображения нехарактерным цветом. Такой дефект может быть устранен путем изменения передаточной характеристики обрабатывающего тракта. Этот же способ может быть применен для устранения искажений, вызванных нелинейностью регистрирующих и отображающих устройств. Это делает желательным использование цветовой коррекции как в телевизионных системах, так и в промышленных системах наблюдения и контроля.

Наиболее простой способ коррекции искажений при передаче изображений используется в аналоговых бытовых телевизионных приемниках. Он получил название коррекции нелинейных искажений [1]. Этот способ основан на знании того, что передающая и индицирующая трубки имеют степенные зависимости между напряжением на модуляторе и яркостью точек на экране, а именно (1) — для передающей и (2) — для индицирующей трубки:

$$U_T = m_T Y_I^{Y_T}, \quad (1)$$

$$Y_O = m_R U_R^{Y_R}, \quad (2)$$

где  $Y_I, Y_O$  — яркости точек исходного объекта и соответствующих точек на отображающем экране соответственно,  $U_T$  и  $U_R$  — напряжения на выходе регистрирующей аппаратуры и на входе отображающей аппаратуры соответственно.

Корректор нелинейных искажений связывает  $U_T$  и  $U_R$  аналогичной зависимостью:

$$U_R = m_K U_T^{Y_K}. \quad (3)$$

При этом получим зависимость исходной и видимой яркостей вида:

$$Y_O = m_R m_K^{Y_K} m_T^{Y_T Y_K} Y_I^{Y_T Y_K Y_R}, \quad (4)$$

где  $m_T, m_R, m_K$  — коэффициенты пропорциональности;  $Y_T, Y_R, Y_K$  — коэффициенты нелинейности передаточных характеристик передающей, приемной аппаратуры и корректирующего блока соответственно.

Из зависимости (4) видно, что для устранения нелинейных искажений необходимо, чтобы

$$Y_T Y_K Y_R = 1 \quad (5)$$

Условие (5) реализуется путем выбора соответствующего значения  $Y_K$ . При необходимости подчеркнуть контраст преимущественно светлых мест это значение следует увеличить, если же требуется подчеркнуть контраст темных мест, например при «вялых» изображениях, значение  $Y_K$  следует уменьшить.

Устройства, реализующие зависимость (3), называются гамма-корректорами. Наиболее распространенные схемы таких устройств основаны на кусочно-линейной аппроксимации. В основе этих схем

лежит аналоговая коммутация резисторов в обратной связи усилительного тракта, благодаря которой реализуется нелинейная передаточная характеристика. Качество аппроксимации зависит от количества сравнивающих и коммутирующих элементов.

Существенным недостатком такой реализации является невозможность подстройки передаточной характеристики и ее реализация исключительно для яркостной составляющей видеосигнала.

Современные высококачественные системы обработки регистрации и обработки видеoinформации для представления цветного изображения используют колориметрическую систему RGB (RED, GREEN, BLUE), в которой цвет любой точки изображения формируется путем комбинации трех базовых цветов: красного, зеленого и синего. Используются и другие форматы, такие как YUV, в которых изображение представлено в виде яркости и цветоразностных сигналов. При этом для сокращения объема передаваемой и хранимой информации используют одинаковые значения цветоразностных сигналов для соседних точек в строке (стандарт 4:2:2) либо в строке и столбцах (стандарт 4:1:1). Однако, по мнению экспертов, это приводит к видимому ухудшению качества изображений.

В [2] рассмотрены математические основы цветовой коррекции изображений в колориметрической системе RGB. Пусть имеется некоторый объект, изображение которого в плоскости OXY можно представить в виде системы функций, определяющих яркость и цветность объекта в точке  $(x, y)$ .

$$\begin{cases} R_I(x, y); \\ G_I(x, y); \\ B_I(x, y). \end{cases} \quad (6)$$

В результате обработки изображение, предлагаемое зрителю, описывается системой функций

$$\begin{cases} R_O(x, y); \\ G_O(x, y); \\ B_O(x, y). \end{cases} \quad (7)$$

связанных с исходной системой (6) соотношением:

$$\begin{cases} R_O(x, y) = H_{RR}(H_{KR}(H_{TR}(R_I(x, y)))); \\ G_O(x, y) = H_{RG}(H_{KG}(H_{TG}(G_I(x, y)))); \\ B_O(x, y) = H_{RB}(H_{KB}(H_{TB}(B_I(x, y)))). \end{cases} \quad (8)$$

где  $H_{TR}, H_{TG}, H_{TB}$  — передаточные характеристики цветных каналов регистрирующей аппаратуры;  $H_{KR}, H_{KG}, H_{KB}$  и  $H_{RR}, H_{RG}, H_{RB}$  — передаточные характеристики обрабатывающей (корректирующей) и отображающей аппаратуры.

Передаточные характеристики регистрирующей и отображающей аппаратуры считаются известными и не подлежащими изменению. Тогда для достижения точности передачи изображения наблюдателю, то есть для обеспечения тождественности систем (6) и (7), можно воспользоваться только изменени-

ем передаточных характеристик обрабатывающей аппаратуры. При этом

$$\begin{cases} H_{KR}(H_{TR}^{-1}) = H_{RR}^{-1}; \\ H_{KG}(H_{TG}^{-1}) = H_{RG}^{-1}; \\ H_{KB}(H_{TB}^{-1}) = H_{RB}^{-1}. \end{cases} \quad (9)$$

где  $H^{-1}$  — обратные функции.

Жесткая реализация соотношения (9) не является желательной. Причина — в отсутствии точных аналитических зависимостей для передаточных характеристик передающей и отображающей аппаратуры вследствие их отличия для различных ее типов и условий применения (как в приведенном примере с видеокамерой). Поэтому задача воспроизведения соотношения (9) расширяется до реализации перестраиваемых передаточных характеристик корректирующего блока. В таком случае корректирующий блок процессора обработки изображений выполняет преобразование согласно соотношению:

$$\begin{cases} R_O(x, y) = h_R(R_I(x, y)); \\ G_O(x, y) = h_G(G_I(x, y)); \\ B_O(x, y) = h_B(B_I(x, y)). \end{cases} \quad (10)$$

где  $h$  — передаточная характеристика соответствующего цветного канала корректора.

Передаточные характеристики задаются в управляющей программе.

## 2.2. Реализация микширования изображений

Другой базовой операцией колориметрической обработки изображений является микширование. При зональном микшировании граница раздела двух изображений может быть замкнутой (фигура) и разомкнутой (шторка). Во время действия эффекта фигура или шторка может быть подвижной или статичной, может вращаться, перемещаться, быть плавной или резкой, окаймленной или модулированной и т. д. Окаймление (бордер) может иметь разную ширину и цвет. Закон модуляции границы может быть неизменным, а также может меняться во время видеоэффекта. Фигуры в процессе выполнения эффекта могут трансформироваться одна в другую, переходить от фигуры к шторке и обратно.

Аддитивное микширование заключается в суммировании видеосигналов нескольких изображений по формуле  $(K_A \cdot A) + (K_B \cdot B) + \dots$ . Составляющие комбинированного изображения при этом как бы просвечивают одна через другую. Для широко применяемого режима X-образного микширования регулируется только один коэффициент  $K_A$  (в пределах от 0 до 1), а второй вычисляется по формуле  $K_B = K_A - 1$ . Контраст составляющих в процессе микширования всегда понижен. В режиме V-образного микширования (переход через «черное») сначала при  $K_B = 0$  коэффициент  $K_A$  уменьшается от 1 до 0, а затем при  $K_A = 0$  коэффициент  $K_B$  возрастает от 0 до 1.

Неаддитивное микширование представляет собой объединение двух видеосигналов  $A$  и  $B$  в соответствии с формулой  $\max(A, B)$ . Этот видеоэффект применяется очень редко.

Наиболее часто используемое аддитивное и зональное микширование математически можно представить в виде линейной комбинации составляющих микшируемых изображений, независимо от используемой колориметрической системы. В цифровой системе обработки видеoinформации, использующей колориметрическую систему RGB, операция микширования может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} R_O(x, y) = K_{R1}(x, y)R_{I1}(x, y) + K_{R2}(x, y)R_{I2}(x, y); \\ G_O(x, y) = K_{G1}(x, y)G_{I1}(x, y) + K_{G2}(x, y)G_{I2}(x, y); \\ B_O(x, y) = K_{B1}(x, y)B_{I1}(x, y) + K_{B2}(x, y)B_{I2}(x, y). \end{cases} \quad (11)$$

где буквенный индекс определяет принадлежность к цветовому каналу, а цифровой индекс — к шине данных.

Для задания зоны микширования вводится понятие коэффициента присутствия. Этот коэффициент выражает долю интенсивности цветовой составляющей в данной точке результирующего изображения, взятую от интенсивности этой цветовой составляющей в той же точке исходного изображения. Вводится также функция присутствия  $K = K(x, y)$ , выражающая зависимость значения коэффициента присутствия  $K$  от координат  $(x, y)$  точки на экране.

Функция присутствия в общем случае может быть различной для различных цветовых составляющих изображения. Однако тогда произойдет изменение не только яркости, но и цветности исходного изображения в результирующем. Это, в свою очередь, приведет к искажению информации об объекте. В случае тождественности функций присутствия для различных цветовых составляющих одного и того же изображения происходит только изменение яркости исходного изображения. В этом случае информация о цвете объекта не искажается. В дальнейших рассуждениях будем считать, что  $K_{R1} = K_{G1} = K_{B1}$  и  $K_{R2} = K_{G2} = K_{B2}$ .

При выполнении аддитивного микширования в общем случае значения коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  являются независимыми. При сложении (соотношение (11)) также возможно переполнение разрядной сетки, устраняемое использованием арифметики с насыщением. Однако это приводит к частичной потере информации об объектах на микшируемых изображениях. Для устранения этого недостатка широко используется X-образное микширование. Оно заключается в установлении связи между функциями  $K_1$  и  $K_2$ :

$$K_2 = 1 - K_1. \quad (12)$$

Управление значениями функции присутствия позволяет формировать фигуры и шторки различных видов.

Как правило, фигуры, используемые при зональном микшировании, симметричны относительно двух осей (ромбы, прямоугольники, кресты, овалы, правильные многогранники с четным числом граней и др.). Это позволяет записывать и хранить в памяти только  $\frac{1}{4}$  часть фигуры. С помощью специального алгоритма чтения такой памяти, возможен синтез всей фигуры. Рассмотрим этот алгоритм на примере фигуры типа «ромб», представленной на рис. 1.

На рис. 1 представлена фигура, для изображения которой используется блок памяти размером  $20 \times 10$  ячеек. Геометрический процессор формирует адреса чтения данной памяти. Для простоты рассуждений считаем, что геометрические преобразования не производятся. Это означает, что точке с координатами  $(x, y)$  экрана соответствует точка с теми же координатами в памяти. Анализ точек изображения фигуры в пределах любой из строк показывает, что чтение точки с координатой  $x = 10$  в точку экрана с той же координатой возможно заменить чтением точки с координатой  $x = 9$  вследствие симметрии изображения фигуры относительно вертикальной оси  $O_1$ . Аналогично можно рассуждать для остальных точек, находящихся справа относительно оси  $O_1$ , а также относительно точек в пределах любого из столбцов относительно оси  $O_2$ . Таким образом, в память достаточно записать изображение  $\frac{1}{4}$  части фигуры. Рассмотренные значения координат являются взаимно дополнительными до максимального значения этой координаты ( $10 + 9 = 19$ ,  $11 + 8 = 19$  и т. д.). Отсюда делаем вывод о том, что для реализации синтеза симметричной фигуры по  $\frac{1}{4}$  ее изображения необходимо вычислить дополнение для адресов  $A_X$  и  $A_Y$  по осям  $X$  и  $Y$  соответственно, поступающим от геометрического процессора:

$$\begin{aligned} DA_X &= \max(A_X) - A_X, \\ DA_Y &= \max(A_Y) - A_Y. \end{aligned} \quad (13)$$

Адреса  $ARd_X$ ,  $ARd_Y$  чтения памяти, хранящей изображение фигуры, формируем согласно соотношению:

$$\begin{aligned} ARd_X &= \begin{cases} A_X, & A_X < DA_X; \\ DA_X, & A_X > DA_X; \end{cases} \\ ARd_Y &= \begin{cases} A_Y, & A_Y < DA_Y; \\ DA_Y, & A_Y > DA_Y. \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

Этот алгоритм применим и для фигур, симметричных только относительно одной оси (например,

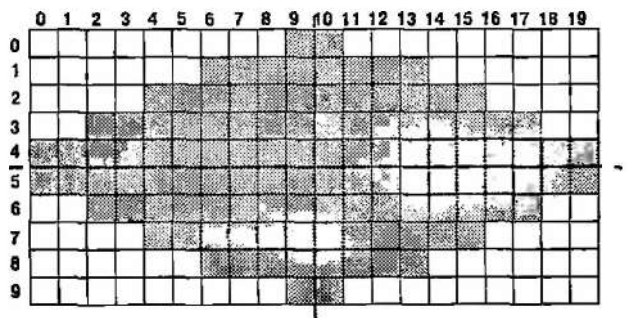


Рис. 1. Пример задания фигуры

цятиконечная звезда). В этом случае в память необходимо прописывать  $\frac{1}{2}$  часть изображения фигуры. Недостаток алгоритма в том, что он неприменим для несимметричных фигур.

Различные типы шторок могут быть получены аналогично фигурам, а также с помощью масштабирования и (или) размножения малой, прописываемой части памяти на всю длину или ширину экрана. Масштабирование, а также перемещение и поворот памяти осуществляется геометрическим процессором, а размножение в простейшем случае — путем маскирования части разрядов адресов чтения памяти. Диагональные шторки формируются аналогично вертикальным и горизонтальным, однако совместно с масштабированием и размножением применяется поворот памяти.

Еще одним недостатком такого способа формирования функций присутствия является необходимость перезаписи памяти для изменения вида фигуры или шторки.

Таким образом, и для реализации цветовой коррекции, и для синтеза функций присутствия следует выполнять аппроксимацию функций от нескольких переменных. Такая задача может быть решена множеством способов. При выборе одного из них главным критерием является возможность аппаратной реализации в реальном времени. При этом временные затраты на ее реализацию должны быть минимальны.

### 3. Использование нейронной сети СМАС для решения поставленных задач

Для решения поставленной задачи оказалось эффективным применение предложенной Дж. Альбусом модели, описывающей процессы управления движением, происходящие в мозжечке, и названной им СМАС — Cerebellar Model Articulation Controller [3, 4]. Эта нейронная сеть работает как ассоциативная память. При этом объем физической памяти для хранения настраиваемых параметров сети, требуемый для аппроксимации функции от нескольких переменных, существенно меньше соответствующего объема при табличном задании функции. Принцип работы данной сети состоит в следующем. Запоминаемая (аппроксимируемая) функция  $y = f(x)$  задается на ограниченном числе точек (значений аргументов)  $x$ , образующих  $N$ -мерное пространство входных сигналов. Данное пространство разбивается на  $M$  подпространств, образуемых входными сигналами  $x(i)$  ( $i = \overline{1, M}$ ). Для хранения значений функции  $y(i)$  (выходных сигналов сети), соответствующих  $x(i)$  ( $i = \overline{1, M}$ ), используется  $p$  ячеек памяти, число которых является постоянным для всех векторов входных сигналов данной сети. При поступлении на вход сети некоторого сигнала  $x(i)$  на ее выходе появляется сигнал  $y(i)$ , представляющий собой сумму содержимого  $p$  адресуемых ячеек.

Отличительной особенностью СМАС является использование в ней специального кодирования, позволяющего резко уменьшить объем памяти, необходимый для хранения обрабатываемой информации. Кодирование информации заключается в том, что каждому  $N$ -мерному входному вектору  $x(i)$  ставится в соответствие  $n$ -мерный ( $n < N$ ) вектор ассоциаций  $a(i)$ , элементы которого могут принимать значения из интервала  $[0, 1]$ . При этом только  $r \ll n$  элементов данного вектора имеют отличные от нуля значения, т. е. только  $r$  элементов памяти являются активными. Дополнительное уменьшение памяти достигается применением хеширования информации.

Структура сети СМАС приведена на рис. 2. В общем случае сеть осуществляет следующие преобразования:

$$S: X \Rightarrow A, H: A \Rightarrow A', P: A' \Rightarrow y, \quad (15)$$

где  $X$  —  $N$ -мерное пространство непрерывных входных сигналов;  $A$  —  $n$ -мерное пространство ассоциаций;  $A'$  — преобразованное алгоритмом хеширования пространство ассоциаций;  $y$  — вектор выходных сигналов.

Преобразования (15) соответствуют кодированию, хешированию информации и вычислению выходного сигнала.

Важным вопросом при реализации сети является выбор базисных функций входного слоя нейронов. В традиционной сети СМАС используются прямоугольные базисные функции, что позволяет осуществлять кусочно-постоянную аппроксимацию. В этом случае вычислительные затраты будут минимальными, вследствие чего значительно сокращается время реакции сети на поступивший входной сигнал. Компоненты вектора ассоциаций при этом могут принимать значения «0» или «1». Скорость обучения сети при выборе базисных функций прямоугольной формы будет максимальной.

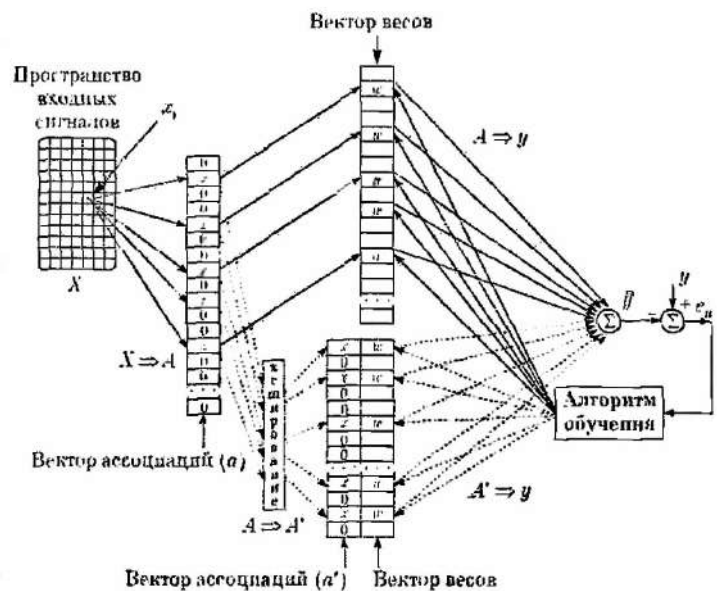


Рис. 2. Структура сети СМАС

Однако в последнее время в нейронной сети СМАС все чаще применяются базисные функции более сложного вида, такие как В-сплайны различных порядков, гауссовские и модифицированные гауссовские функции, косинусоидальные функции. Выбор базисной функции существенно влияет на точность аппроксимации.

Выходной сигнал сети определяется формулой (16).

Обучение сети СМАС состоит в настройке вектора ее весовых параметров  $w$ . Оно происходит на основании предъявления ей обучающих пар  $\{x(k), y(k)\}$  и сравнения реакции сети  $\hat{y}(k)$  с требуемой  $y(k)$ . Алгоритм обучения может быть записан в виде (17).

$$\hat{y} = H(a^T \Phi(x))w, \quad (16)$$

$$\text{где } \Phi(x) = \begin{bmatrix} \Phi_1(x) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \Phi_2(x) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \Phi_n(x) \end{bmatrix}, \quad \Phi_i(x) = \prod_{j=1}^N \Phi_{ij}(x_j);$$

$\Phi_{ij}(x_j)$  — значение выбранной базисной функции в точке  $x_j$ .

$$w(k+1) = w(k) + \frac{y(k) - \hat{y}(k)}{\|\Phi(x(k))a(k)\|^2} \Phi(x(k))a(k). \quad (17)$$

Сложной является задача выбора оптимального значения параметра  $\rho$ , однако существуют некоторые рекомендации, позволяющие подобрать значение данного параметра близким к оптимальному. Длину вектора ассоциаций и число физических ячеек памяти можно определить по формуле

$$n \approx \left\lceil \rho \left( \frac{R-1}{\rho} + 1 \right)^N \right\rceil, \quad (18)$$

где  $\lceil \bullet \rceil$  означает округление в сторону ближайшего большего целого числа,  $R$  — используемое число уровней квантования входных сигналов,  $\rho$  — число областей квантования.

Из (18) следует, что при выборе  $\rho = 1$  длина вектора ассоциаций составит  $R^N$ , что соответствует табличному способу задания функции. В данном случае обучение сети не проводится и в каждую ячейку памяти записываются соответствующие значения функции. Заметим, что в этом случае в качестве базисных возможен выбор функций только прямоугольной формы и данная сеть будет производить кусочно-постоянную аппроксимацию функции.

Требуемый объем памяти будет минимален в случае выбора  $\rho = R$ . Но в связи с сокращением объема памяти это существенно скажется на точности аппроксимации. Кроме того, при таком выборе значения параметра  $\rho$  значительно увеличится время, необходимое для кодирования поступившего входного сигнала. Это связано с необходимостью вычисления  $N \cdot R$  значений базисных функций.

Следует заметить, что на некотором интервале  $[1, \rho_{\text{opt}}]$  увеличение значения параметра  $\rho$  приводит к увеличению точности аппроксимации, а в интер-

вале  $(\rho_{\text{opt}}, R]$  с ростом  $\rho$  происходит заметное ухудшение аппроксимирующих свойств сети в воз- растающие время реакции на входной сигнал.

Таким образом, увеличение значения параметра  $\rho$ , с одной стороны, приводит к уменьшению требуемого объема памяти, а с другой — к увеличению времени кодирования входного сигнала, а начиная с некоторого  $\rho_{\text{opt}}$  — к ухудшению аппроксимирующих свойств сети.

При практической реализации сети СМАС рекомендуется вначале выбрать значение параметра  $\rho$  равным  $\left\lfloor \frac{R}{2} \right\rfloor$ , а затем, в случае получения неудовлетворительных результатов, производить его увеличение либо уменьшение, оценивая изменение времени кодирования входного сигнала, объема требуемой памяти и точности аппроксимации.

#### 4. Модель синтеза функций присутствия при микшировании изображений в реальном времени на основе нейронной сети СМАС

Аппаратная реализация сети СМАС рассмотрена в [5]. Там предлагается использовать значения числа ступеней квантования, равные степеням числа 2. Это позволяет существенно снизить аппаратные затраты на реализацию кодирования переменных.

В случае использования сети СМАС для синтеза функций присутствия при микшировании входными переменными являются координаты точки на экране, которые при построчной развертке изображения изменяются последовательно. В этом случае упрощается реализация блока кодирования переменных для произвольного числа ступеней. В результате анализа затрат в качестве переменной, для которой номера ступеней кодирования изменяются последовательно, выбрана координата  $y$ . Структура блока кодирования переменных для этого случая приведена на рис. 3.

Частота, с которой осуществляется кодирование, должна быть в  $\rho$  раз больше частоты следования точек. Для ее синтеза используется система автоматической подстройки частоты PLL. Вследствие того, что для любой строки переменная  $y$  постоянна, для ее кодирования используется счетчик с модулем  $\rho$ , который формирует аргумент базисной функции  $u_y^j$  и значение переноса, используемое счетчиком формирования номера нейрона на ступени кодирования  $NNS_y^j$  переменной  $y$ . Для устранения диагональной структуры ассоциативного поля номера ступеней для кодирования переменной  $x$  не должны изменяться последовательно. Они формируются блоком формирования  $j_x$  и, поступая на сумматоры совместно со значениями аргумента базисной функции  $u_x^0$  и номера нейрона  $NNS_x^0$  на 0-й ступени кодирования, формируют соответствующие значения на ступени  $j$ .

Микширующий блок для работы с видеосигналами в реальном времени, использующий для синтеза

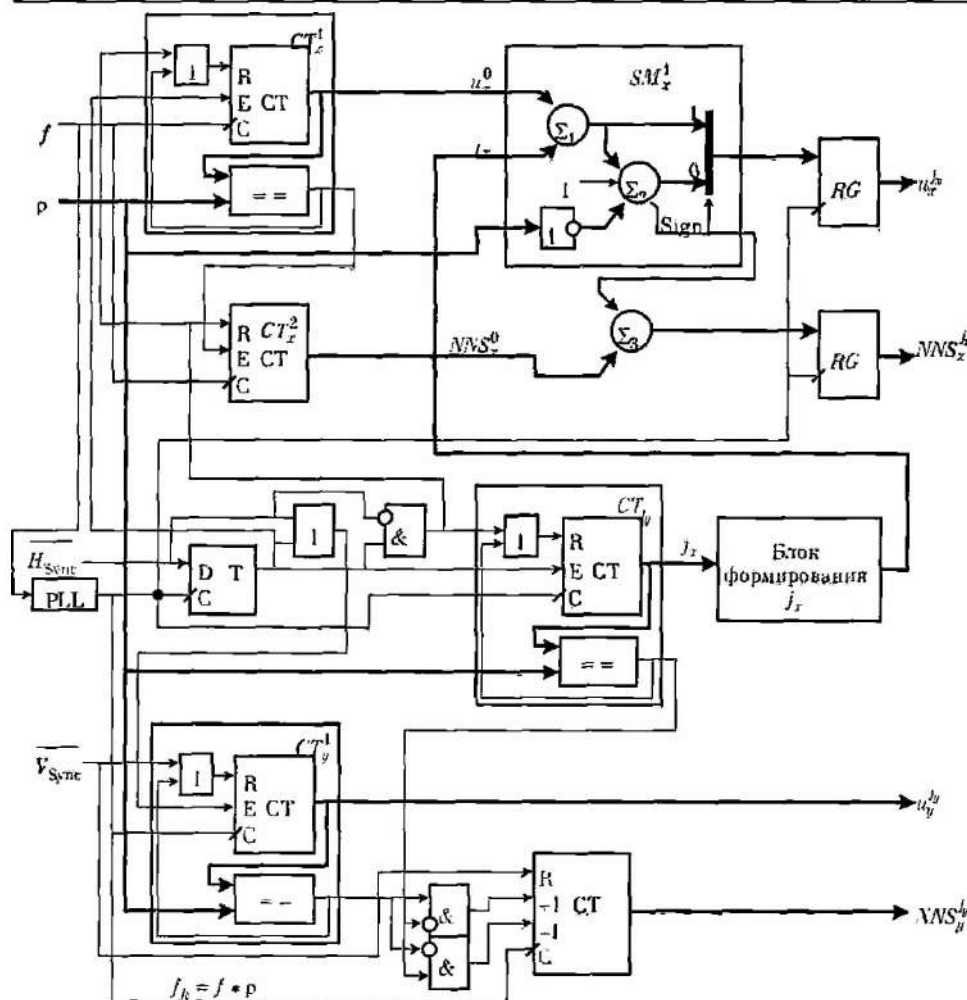


Рис. 3. Структура блока кодирования последовательно изменяющихся переменных

функций присутствия сеть СМАС, представлен на рис. 4.

Структуру сети СМАС образуют блок кодирования переменных (БКП), оперативные запоминающие устройства для хранения значений произведений базисных функций (ОЗУ ПФФ) и значений весов (ОЗУ весов), умножитель М1 и накапливающий сумматор  $\Sigma_1 - Rg1$ . Мультиплексоры МХ1 и МХ2, а также буферные элементы В1 и В2 необходимы для инициализации ОЗУ. БКП в качестве входных переменных использует сигналы тактовой частоты  $f_t$  и строчной синхронизации  $H_{Sync}$ . Эти сигналы соответствуют последовательно перебираемым координатам  $x$  и  $y$  текущей точки в микшируемых изображениях. Структура БКП представлена на рис. 3.

Вычисленное сетью СМАС значение функции присутствия для данной точки через мультиплексор МХ3 поступает на регистр Rg2, в котором сохраняется в течение длительности точки. Мультиплексор МХ3 предназначен для обеспечения возможности микширования изображений с использованием постоянного для всего кадра значения функции присутствия либо с использованием  $\alpha$ -канала, формируемого на шине АК. Последний удобен для вывода на изображение логотипов или титров различной степени прозрачности и сложности.

Операция микширования выполняется на умножителе М2 и сумматоре  $\Sigma_2$ . Для сокращения аппаратных затрат в структуре предложена последовательная реализация соотношения (11). Первую половину периода тактовой частоты через мультиплексор МХ4 на умножитель М2 поступает значение интенсивности цветовой составляющей с шины данных ШД1. На второй вход умножителя через управляемый инвертор  $=1$  (по своей сути это схема «исключающее ИЛИ», на один вход которой подано значение функции присутствия, а на второй — тактовая частота следования точек) поступает значение функции присутствия в прямом коде. По истечении первой половины периода вычисленное умножителем значение произведения  $K * I_1$  запоминается в регистре

Rg3. В течение второй половины периода тактовой частоты на умножитель М2 поступают значение интенсивности с шины данных ШД2 и значение функции присутствия в обратном коде. Вычисляется произведение  $(1-K) * I_2$  и поступает на сумматор  $\Sigma_2$ , на который также поступает сохраненное в регистре Rg3 значение произведения  $K * I_1$ . Вычисленное значение суммы произведений запоминается в регистре Rg4.

Теоретически область допустимых значений функции присутствия определяется интервалом  $[0, 1]$ . Однако на практике использование дробных значений приводит к усложнению вычислений и потере их наглядности. Поэтому на практике предлагается считать областью определения функции присутствия интервал  $K = [0, 255]$ , а результирующее значение интенсивности определять по соотношения:

$$I(x, y) = \frac{K(x, y)I_1(x, y)}{256} + \frac{(255 - K(x, y))I_2(x, y)}{256},$$

$$K(x, y) \in [0, 255]. \tag{19}$$

Операция деления на 256 выполняется путем сдвига результата умножения на 8 разрядов влево или, что то же самое, путем взятия в качестве

результата перемножения старших 8-ми разрядов результата.

Для замены выражения (1-K) в (12) на (255-K) в (19) сделаем следующее допущение: за 1 принимается значение  $K = 255$ , а не 256, как этого следовало ожидать. Такое допущение не приводит к видимым изменениям в результирующем изображении и может быть выполнено путем инвертирования значения  $K$ . Это позволяет несколько сократить аппаратные затраты на перевод обратного кода в дополнительный.

В целом реализация эффектов микширования с использованием структуры, приведенной на рис. 5, состоит в следующем. Оператор, работающий за управляющей ЭВМ, создает изображение шторки или фигуры путем ее построения в каком-либо графическом редакторе. Возможна также генерация шторки или фигуры путем программной реализации некоторой аналитической зависимости. Сформированное изображение фигуры или шторки представляется программной модели сети СМАС, которая вычисляет значения весов, необходимые для аппроксимации этого изображения. Полученный массив весов передается по интерфейсу «ЭВМ — блок связи видеопроцессора». Далее адреса и значения весов по шине команд и данных (ШКД) поступают на микширующий блок, где после дешифрации команды в блоке УУДК формируются соответствующие адреса и данные для инициализации ОЗУ весов. После инициализации ОЗУ весов микширующий блок готов к работе.

Предусмотренное изменение значения  $\rho$  и вида базисных функций обеспечивает возможность изменять соотношение качество/скорость эффекта микширования. Так, при больших значениях  $\rho$  ухудшается качество аппроксимации, но уменьшается объем передаваемых параметров. Качество аппроксимации зависит также и от того, какой вид базисных функций используется для той или иной функции присутствия. Выбор вида базисных функций является предметом исследований.

Главным преимуществом предлагаемой реализации по сравнению с табличным методом задания функций присутствия является меньший объем передаваемых параметров, а по сравнению с алгоритмическим методом — высокая универсальность, то есть применимость для несимметричных функций присутствия произвольного вида.

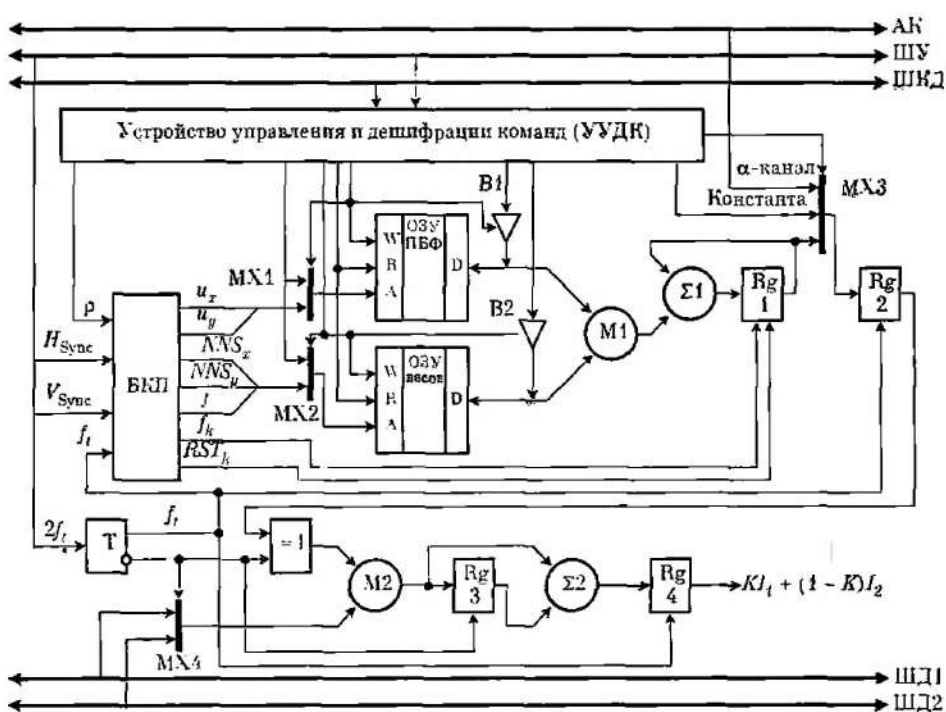


Рис. 4. Структура микширующего блока

В структуре на рис. 4 не используется хеширование вектора ассоциаций. Это связано с тем, что требуемые объемы памяти достаточно малы, а возникновение хеш-коллизии может привести к нежелательным артефактам на функциях присутствия, что не оправдывается еще большим сокращением объемов памяти.

### 5. Модель цветовой коррекции изображений в реальном времени на основе нейронной сети СМАС

Структура цветового корректора, в основе которого лежит аппроксимация передаточной характеристики сетью СМАС, представлена на рис. 5. В ее основе лежит сеть СМАС, имеющая три входные переменные и вычисляющая три функции.

Для реализации сети имеется три идентичных блока кодирования переменных R, G, B (соответственно БКП R, БКП G, БКП B). ОЗУ для хранения произведенных базисных функций (ОЗУ ПБФ), общее для трех реализуемых функций (ОЗУ для хранения весов для каждой цветовой составляющей (ОЗУ весов R, G и B), умножители M1 и накапливающие сумматоры Σ1, вычисляющие произведение векторов весов и коэффициентов. В рассматриваемой структуре используется колориметрическая система RGB как наиболее наглядная и обеспечивающая наилучшее качество изображения. Для системы YUV структура будет идентичной. Изменится лишь интерфейс задания передаточной характеристики. Подобно рассмотренной в структуре микширующего блока имеются элементы (мультиплексоры MX1, MX2R, MX2G, MX2B и буферные элементы B1, B2R, B2G, B2B) для инициализации используемых в структуре ОЗУ значениями от управляющей ЭВМ.

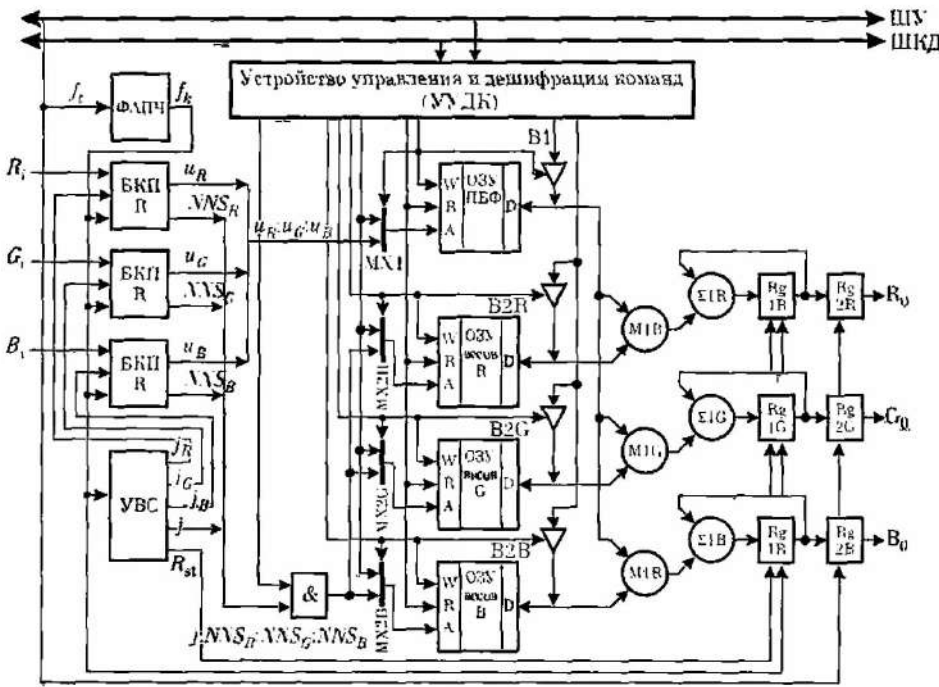


Рис. 5. Структура цветного корректора

В рассмотренной структуре имеется элемент «логическое П», осуществляющий управляемое маскирование старших разрядов формируемого адреса в ОЗУ весов. Так предлагается выполнять операцию хеширования вектора ассоциаций по модулю, равному степени числа 2. Хеширование применено для сокращения объема передаваемых из ЭВМ в видеосистему данных. К примеру, при задании передаточной характеристики оператор желает видеть изменения на реальном видеотоке. Для этого вводится большой коэффициент хеширования, чем обеспечивается сокращение объема настраиваемых и передаваемых весов. При этом качество аппроксимации будет снижено, но достаточно для визуальной оценки выполняемых корректировок. Когда будет получен требуемый результат, степень хеширования уменьшается либо вообще не используется. Настраиваются и передаются все веса, а качество аппроксимации будет максимальным.

В отличие от синтезатора функций присутствия, входные переменные цветного корректора изменяются последовательно. Вследствие этого предлагается использовать блок кодирования переменных, работающий со значениями  $\epsilon$ , равными степени числа 2. Такой блок рассмотрен в [5]. Отличие состоит в том, что на выходе БКП идет не значение базисной функции, а ее аргумент  $u$ . Эти аргументы путем конкатенации разрядов объединяются и поступают на адресный вход ОЗУ хранения произведений базисных функций. Основной эффект от такой реализации состоит в сокращении аппаратных и временных затрат на реализацию вычисления произведения

трех переменных и упрощения схем инициализации ОЗУ. При значениях  $\rho = 4, 8, 16$  и  $32$  объем ОЗУ ПБФ составит соответственно  $64, 512, 4096$  и  $32768$  ячеек.

Система ФАПЧ обща для всех трех БКП и предназначена для синтеза частоты кодирования.

Устройство выборки ступени формирует номера ступеней кодирования для каждого БКП. Оно может быть реализовано как счетчик с непоследовательным счетом, либо как линейный рекуррентный регистр с добавленным комбинации «все нули».

Традиционный способ задания кривой коррекции,

основанный на задании опорных точек на передаточной характеристике и интерполяции кривой не дает возможности получить зависимость от всех входных цветовых составляющих. Можно предложить следующий способ, рассмотренный на примере красного цветного канала:

1. Строится передаточная характеристика  $R_{out} = f_R(R_{in}, 0, 0)$  путем графического задания дополнительных точек на графике в системе координат  $(R_{in}, R_{out})$  так, как в традиционном методе.

2. В системе координат  $(G_{in}, B_{in})$  задаем положение точек, в которых интенсивность красного цвета должна зависеть от значений интенсивности зеленого и синего цветов.

3. В системах координат  $(G_{in}, \Delta R_{out}), (B_{in}, \Delta R_{out})$  задаются величины и знак зависимости красного от зеленого и синего цветов соответственно.

4. Получаем несколько точек передаточной характеристики для канала красного цвета:

$$R_{out} = f_R(R_{in}, 0, 0) + \Delta R_{out}(G_{in}) + \Delta R_{out}(B_{in}).$$

5. Предъявляем полученные точки в качестве обучающих программной модели сети СМАС.

Главными достоинствами предлагаемой реализации являются сокращение объема памяти и передаваемых данных по сравнению с табличным методом при сохранении универсальности и широких возможностей цветокоррекции, которые обеспечиваются за счет синтеза передаточных характеристик, зависящих от всех цветовых составляющих изображения.

**6. Заключение**

Предлагаемые модели синтеза функций присутствия при микшировании изображений и реализации цветовой коррекции, основанные на аппроксимации функций от нескольких переменных нейронной сетью СМАС в реальном времени, в качестве преимущества по сравнению с существующими табличными методами позволяют снизить объем хранимых и передаваемых параметров. Это не только позволяет сократить аппаратные затраты, но и получить новые преобразования и видеоэффекты, связанные с микшированием, использующим несимметричные функции присутствия сложной формы, и с синтезом передаточных характеристик цветового корректора, зависящих от всех трех цветов разложения исходного изображения. Предложен способ задания таких передаточных характеристик в управляющей программе. Для оценки снижения объемов параметров приведем таблицу 1 для модели синтеза функций присутствия и таблицу 2 для модели цветовой коррекции.

Таблица 1

Табличный метод для фигур		Предлагаемый метод для произвольных фигур			
произвольных	симметричных	$\rho = 4$	$\rho = 8$	$\rho = 16$	$\rho = 32$
207 360	51 840	52 600	26 810	13 920	7488

Из таблицы 1 видно, что при  $\rho = 4$  предлагаемая модель для произвольных фигур практически не уступает табличному методу для симметричных относительно обеих осей фигур и почти в 4 раза сокращает объем памяти для произвольных фигур. Уже

при  $\rho = 8$  предлагаемая модель почти в 2 раза сокращает объем памяти даже по сравнению с табличным методом для симметричных фигур и почти в 8 раз для произвольных. Большие значения  $\rho$  позволяют сократить объем памяти до 27 раз.

Таблица 2

Табличный метод	Предлагаемый метод			
	$\rho = 4$	$\rho = 8$	$\rho = 16$	$\rho = 32$
3·16 777 216	3·1085 874	3·284 242	3·77 744	3·23 086

В приведенной таблице представлены объемы памяти для 8-битного представления цветовых составляющих. Для предлагаемой модели выполнения цветовой коррекции объемы указаны без выполнения кеширования. Как видно из приведенных данных, экономия объемов составляет от 15,5 до 726 раз. С применением кеширования эти показатели могут быть увеличены еще в несколько раз.

Список литературы: 1. Дюбругов Р. М. Телевидение: 2-е изд. — К.: Вища школа, 1988. — 215 с. 2. Основные задачи колориметрической обработки изображений и их решение в цифровом видеопроцессоре // Вестник НТУ ХПИ — 2003 — № 5. 3. Albus J. S. A new approach to manipulator control: the cerebellar model articulation controller (CMAC) // ASME Trans., J. Dynamic Systems, Measurement and Control. — 1975. — Vol. 97, № 3. — P. 220-227. 4. Albus J. S. Data storage in cerebellar model articulation controller (CMAC) // ASME Trans., J. Dynamic Systems, Measurement and Control. — 1975. — Vol. 97, № 3. — P. 228-233. 5. Бессонов А. А., Бобух В. А., Руденко О. Г. Аппаратная реализация нечеткой сети СМАС и ее применение для задач сжатия изображений // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. — 2005. — № 2(16). — С. 47-52.

Поступила в редколлегию 21.08.2006

И. Д. Вечирская

## О РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

### 1. Введение

На сегодняшний день процесс обработки данных в интеллектуальных системах основан на конкретных знаниях о предметной области. Однако сами системы представления знаний, которые моделируют деятельность человека, недостаточно формализованы [1]. Способов представления знаний разработано достаточно много, и каждый из них обладает своими достоинствами и недостатками, наделен определенной структурой, следовательно, каждая система представления знаний эффективна на предметных областях определенной структуры. Естественно, что чем более обобщенный характер носит язык представления знаний, тем на большем разнообразии предметных областей он может быть реализован. Таким универсальным языком представления знаний можно считать язык алгебры конечных предикатов (АКП), поскольку он позволяет формализовать самые различные отношения.

На языке АКП неоднократно предпринимались успешные попытки формализации различных естественно-языковых структур. В последних работах в этом направлении была предложена логическая сеть для реализации окончаний прилагательных, существительных и глаголов, а линейные логические преобразования в свою очередь являются основным средством для ее построения. Отметим следующие преимущества логических сетей:

1) логическая сеть напрямую связана с алгеброй предикатов (т. е. это схемная реализация формул алгебры предикатов);

2) в логических сетях входная и выходная информация представлена в виде принадлежности к множеству, т. е. речь идет о представлении не данных, а знаний (буквенные переменные задают с помощью дужков проволочек);

3) промежуточные переменные логической сети гарантируют отсутствие пробук.

Таким образом, развитие теории линейных логических преобразований является необходимой и перспективной задачей для понимания естественного языка [2, 3]. Кроме этого, с помощью линейных логических преобразований можно провести естественную аналогию между АКП и теорией баз данных, которая взаимно обогащает и ту, и другую. Язык алгебры предикатов и предикатных операций эффективен и удобен для описания различной формализуемой информации, формирования запросов в базах данных и моделирования деятельности человека.

### 2. Постановка и решение обратной задачи для линейных логических преобразований

*Постановка задачи.* Важной представляется задача нахождения по выходному логическому вектору  $n$  ядру преобразования входного логического вектора, так называемая обратная задача для линейных логических преобразований. Представим далее обратную задачу в формальном виде. Пусть в уравнении  $Q(y) = K(x, y)P(x)$  известны бинарный  $K(x, y)$  и унарный  $Q(y)$  предикаты; необходимо найти предикат  $P(x)$ . Представим предикаты  $K(x, y)$ ,  $Q(y)$ ,  $P(x)$  в матричном виде следующим образом:

$$K(x, y) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1, n-1} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2, n-1} & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m-1, 1} & a_{m-1, 2} & \dots & a_{m-1, n-1} & a_{m-1, n} \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{m, n-1} & a_{mn} \end{pmatrix}$$

$$Q(y) = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_{m-1} \\ y_m \end{pmatrix}, \quad P(x) = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{pmatrix}.$$

Сведем нашу задачу к следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = a_{11}x_1 \vee a_{12}x_2 \vee \dots \vee a_{1, n-1}x_{n-1} \vee a_{1n}x_n; \\ y_2 = a_{21}x_1 \vee a_{22}x_2 \vee \dots \vee a_{2, n-1}x_{n-1} \vee a_{2n}x_n; \\ \dots \\ y_m = a_{m1}x_1 \vee a_{m2}x_2 \vee \dots \vee a_{m, n-1}x_{n-1} \vee a_{mn}x_n. \end{cases} \quad (1)$$

Таким образом, чтобы найти решение обратной задачи для линейных логических преобразований, необходимо решить систему (1) относительно переменных  $x_1, \dots, x_n$ .

*Выбор и обоснование метода решения.* Для решения системы (1) воспользуемся методом получения общего решения параметрических уравнений с  $n$  переменными. Этот метод дает возможность записать общего решения уравнения, не перебирая их по одному, тем более, что такой перебор на практике часто затруднителен и порой невозможен. Кроме этого, при использовании метода исчезает необходимость привязки к внутренней структуре конкретного предиката. Для удобства применения аппарата АКП к решению логических уравнений в [4] была решена задача нахождения системы аксиом, определяющих АКП с точностью до изоморфизма. Решение этой задачи позволило рассматривать конечные предикаты как элементы абстрактной алгебры. Поскольку АКП представляет собой разновидность булевой алгебры



$$f_{n-1}(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, x_1, \dots, x_{n-2}) = 1$$

где

$$f_{n-1} = f_n(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, x_1, \dots, x_{n-2}, 1) \vee \\ \vee f_n(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, x_1, \dots, x_{n-2}, 0).$$

Решение  $x_{n-1}$  выразится некоторой формой:

$$x_{n-1} = F_{n-1}(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, x_1, \dots, x_{n-2}, P_{n-1}).$$

Двигаясь таким образом далее, придем к уравнению

$$f_2(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, x_1) = 1$$

где

$$f_2 = f_3(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, x_1, 1) \vee \\ \vee f_3(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, x_1, 0).$$

Критерий существования решения этого уравнения

$$f_1(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m) = 1$$

где

$$f_1 = f_2(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, 1) \vee \\ \vee f_2(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, 0).$$

Само решение выразится следующей формой:

$$x_1 = F_1(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, P_1).$$

Рассмотрим на примере применение метода получения общего решения параметрического уравнения с переменными, решая обратную задачу для линейных логических преобразований.

Как известно [2], линейные логические преобразования представимы формулой  $Q(y) = \exists x \in AK(x, y)P(x)$ . Для решения обратной задачи необходимо по известному выходному логическому вектору  $Q(y)$  и ядру преобразования  $K(x, y)$  найти входной логический вектор  $P(x)$ . При решении систем логических уравнений с параметрами возникает необходимость рассмотрения матриц с элементами из булевой алгебры. В [4, 6] исследованы полные логические пространства и показано, как они приводят к матрицам. Условия задачи запишем в матричном виде.

Пусть логический вектор  $Q(y)$  задан элементами  $y_1 = 0, y_2 = 1$ . Матрица ядра логического преобразования задана элементами  $a_{11} = 0, a_{12} = 1, a_{21} = 1, a_{22} = 1$ . Запишем систему уравнений (1) в общем виде:

$$\begin{cases} y_1 = a_{11}x_1 \vee a_{12}x_2, \\ y_2 = a_{21}x_1 \vee a_{22}x_2. \end{cases}$$

Запишем систему в виде уравнения и приведем ее к каноническому виду (2):

$$f = (y_1(a_{11}x_1 \vee a_{12}x_2) \vee \overline{y_1(a_{11}x_1 \vee a_{12}x_2)}) \wedge \\ \wedge (y_2(a_{21}x_1 \vee a_{22}x_2) \vee \overline{y_2(a_{21}x_1 \vee a_{22}x_2)}) = 1$$

Найдем далее по формуле (3) все функции  $f_i$ 

$$f_2 = (y_1(a_{11}x_1 \vee a_{12}) \vee \overline{y_1(a_{11}x_1 \vee a_{12})}) \wedge \\ \wedge (y_2(a_{21}x_1 \vee a_{22}) \vee \overline{y_2(a_{21}x_1 \vee a_{22})}) \vee \\ \vee (y_1a_{11}x_1 \vee \overline{y_1a_{11}x_1})(y_2a_{21}x_1 \vee \overline{y_2a_{21}x_1}).$$

Найдем функцию  $f_1$  и, подставив входные значения, проверим выполнимость критерия существования решения исходного параметрического уравнения:

$$f_1 = (y_1(a_{11} \vee a_{12}) \vee \overline{y_1(a_{11} \vee a_{12})})(y_2(a_{21} \vee a_{22}) \vee \\ \vee \overline{y_2(a_{21} \vee a_{22})}) \vee (y_1a_{11} \vee \overline{y_1a_{11}})(y_2a_{21} \vee \overline{y_2a_{21}}) \vee \\ \vee (y_1a_{12} \vee \overline{y_1a_{12}})(y_2a_{22} \vee \overline{y_2a_{22}}) \vee y_1y_2.$$

Таким образом, было получено  $f_1 = 1$ . Следовательно, условие существования решения уравнения выполняется. Далее переходим к непосредственному поиску решений уравнения. Находим  $x_1$ , пользуясь Утверждением 4 и формулой для вычисления функции:

$$x_1 = \frac{f_2(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, y_1, y_2, 1)P_1 \vee \\ \vee f_2(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, y_1, y_2, 0)}{f_1} \\ x_1 = 1.$$

Находим общий вид решения  $x_2$ , пользуясь Утверждением 4 и формулой для вычисления функции  $f$

$$x_2 = \frac{f_2(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, y_1, y_2, x_1, 1)P_2 \vee \\ \vee f_2(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, y_1, y_2, x_1, 0)}{f}$$

В нашем случае общий вид решения  $x_2$  будет зависеть только от параметра  $P_2$ , то есть представим булевой формой  $x_2 = K_2(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, P_2)$ , в отличие от булевой формы в общем случае, поскольку для переменной  $x_1$  удалось найти сразу значение решения, а не только булеву форму в виде зависимости от параметра  $P_1$ , как следовало бы ожидать. Далее подставляем в выражение для  $x_2$  условия задачи и найденное значение переменной  $x_1$ . Получим  $x_2 = 0$ . Таким образом было найдено единственное решение обратной задачи для заданного линейного логического преобразования в виде значений входного вектора  $(1, 0)$ .

Можно описать также второй метод решения параметрического уравнения. В этом случае критерий существования решения и само решение для  $x_1 = K_1(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, P_1)$  получаются соответственно по формулам предыдущего алгоритма. Однако исчезает необходимость в нахождении булевых форм, поскольку решение  $x_1$  сразу подставляется в уравнение, полученное на предыдущем шаге (как в нашем случае). Этот процесс должен продолжаться, пока не будут получены все искомые значения переменных.

*Условие единственности решения уравнения.* Также представляет интерес исследование вопроса о единственности решения параметрического уравнения.

*Утверждение 5.* Для того, чтобы уравнение

$$xf(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, 1) \vee \\ \vee \overline{xf(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, 0)} = 1$$

имело единственное решение, необходимо и достаточно, чтобы выполнялось условие

$$f(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, 1) = f(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, 0).$$

Таким образом, для того, чтобы параметрическое уравнение с переменными имело единственное решение, необходимо и достаточно, чтобы выполнялась конъюнкция условий следующего вида:

$$f_1(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, 1) = f_1(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, 0).$$

Проверим выполнение Утверждения 5 на примере решения обратной задачи для линейного логического преобразования по условиям предыдущего примера. Необходимо найти в общем виде для параметрического уравнения с двумя переменными функции следующего вида:

$$\begin{aligned} f_2(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, y_1, y_2, 1) &= \\ &= (y_1(a_{11} \vee a_{12}) \vee y_1(a_{11} \vee a_{12})) \wedge (y_2(a_{21} \vee a_{22}) \vee \\ &\vee y_2(a_{21} \vee a_{22})) \vee (y_1 a_{11} \vee y_1 a_{11})(y_2 a_{21} \vee y_2 a_{21}), \\ f_2(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, y_1, y_2, 0) &= \\ &= (y_1 a_{12} \vee y_1 a_{12})(y_2 a_{22} \vee y_2 a_{22}) \vee y_1 y_2. \end{aligned}$$

Подставив в полученные функции известные значения параметров, получим выполнение критерия единственности решения исходного параметрического уравнения. Таким образом,

$$\begin{aligned} f_2(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, 1) &= \\ &= f_2(a_{11}, \dots, a_{mn}, y_1, \dots, y_m, 0) = 1 \end{aligned}$$

Действительно, при решении обратной задачи для заданного линейного логического преобразования было найдено единственное решение в виде значений входного вектора (1, 0).

### 3. Перспективы применения метода решения параметрического уравнения с $n$ переменными для работы логической сети

Логическая сеть [7] во многом сходна с семантическими сетями. В то же время сам метод построения логической сети основан на эвристиках — конкретных правилах грамматики и закономерностях русского языка. И хотя благодаря параллельной обработке знаний поиск по сети происходит достаточно быстро и точно, само построение сети в каждом отдельном случае трудоемко и зависит от конкретной области определения решаемой задачи. Кроме этого, работа самой сети имеет скорее параллельно-последовательный характер. Поскольку после того, как знания во всех узлах сети обрабатываются параллельно, они выдаются на выходе в каждом отдельном узле последовательным образом. Так, если найдено неоднозначное решение (более одного решения), далее обработка идет последовательно, что естественным образом уменьшает быстродействие сети. В настоящее время логическая сеть работает следующим образом: находим возможные значения в узлах, а потом вручную (или последовательно) подаем и получаем значение промежуточной переменной для внутренних узлов сети (так, например, узел «окончание» у прилагательных). Однако представляется целесообразным с помощью введения дополнительных узлов справиться с этой проблемой (на этих же принципах строилась изначально сама логическая сеть). Такими узлами могут служить параметры  $P_i$ , которые появляются при нахождении неизвестных

значений переменных методом решения параметрического уравнения с  $n$  переменными. При этом значениями параметра  $P_i$  будут служить все значения из области определения. Для пояснения остановимся на примере, рассмотренном ранее. Пусть  $x \in \{a, b\}$ ,  $y \in \{a, b\}$ . При этом  $K(x, y) = x^a y^b \vee x^b y^a$   $K(x, y) = x^a y^b \vee x^b y^a \vee x^b y^b$ . Ядро линейного логического преобразования также можно представить в виде следующей таблицы:

	$y$	$a$	$b$
$x$			
$a$		0	1
$b$		1	1

Таким образом, при решении обратной задачи для линейного логического преобразования значениями для параметра  $P_i$  будут значения из области определения переменной  $x$  —  $a$  и  $b$ . Решение задачи нахождения входного вектора по выходному и ядру преобразования позволяет понять, каким образом могут появляться дополнительные узлы при работе логической сети в обратную сторону [8].

### 4. Выводы

Таким образом, в процессе исследований были получены следующие результаты:

- обратная задача для линейных логических преобразований представлена в формальном виде;
- записаны условия существования и единственности решения для поставленной задачи;
- с помощью метода решения параметрического уравнения с  $n$  переменными найден входной вектор линейного логического преобразования в общем виде;
- обозначены перспективы и намечены пути применения метода решения параметрического уравнения с  $n$  переменными для работы логической сети.

Список литературы: 1. Алешина Н. А., Алисов А. М. и др. Логика и компьютер. Моделирование рассуждений и проверка правильности программ. — М.: Наука, 1990. — 240 с. 2. Ротин И. М. Линейные и билинейные логические операторы и их применение в автоматизированных информационных системах: Дис. ... канд. техн. наук. — Х.: ХНУРЭ, 1994 — 103 с. 3. Вечерская И. Д., Дударь З. В. Решение задачи идентификации произвольного линейного логического преобразования // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2006. — № 5. — С. 63–66. 4. Ситников Д. Э. Методы решения уравнений алгебры конечных предикатов с параметрами и их применение в информационных системах: Дис. ... канд. техн. наук. — Х.: ХНУРЭ, 1991. — 177 с. 5. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. Теория интеллекта. Математические средства. — Х.: Вища школа, 1984. — 144 с. 6. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. Неполные и полные логические пространства // Проблемы биопсихики. — 1991. — Вып. 46. — С. 10–17. 7. Бондаренко М. Ф., Дударь З. В., Ефимова И. А. и др. О мозгоподобных ЭВМ // Радиотехника и информатика. — 2004. — № 4. — С. 83–99. 8. Бондаренко М. Ф., Чижкина В. А., Шабанов-Кушнаренко Ю. П. Модели языка // Биопсихика интеллекта. — 2004. — № 1(61). — С. 27–37.

Поступила в редакцию 16. 10. 2006

УДК 519.6:621.395.74

И. В. Гребенник, А. Ю. Хабаров

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТ В СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

### 1. Введение

Задача планирования выполнения работ на заданный период времени является актуальной для многих предприятий. Специфика технологических процессов и критериев их оценки порождает большое разнообразие постановок задач эффективного планирования работ [1]. В ряде случаев известные модели, использующиеся в календарном планировании, не являются адекватными реальным практическим задачам. Следовательно, возникает проблема разработки новых математических моделей указанного класса и использования их в системах поддержки принятия решений, ориентированных на различные предметные области. Одним из путей построения математических моделей задач планирования работ в различных постановках является использование результатов геометрического проектирования [2].

Целью настоящей работы является разработка класса математических моделей оптимизационных задач планирования работ на основе конструктивных средств геометрического проектирования и применение указанных моделей в интеллектуальных системах поддержки принятия решений.

Как следует из [2], задачи геометрического проектирования связаны с преобразованием геометрической информации. При этом модели геометрического проектирования могут использоваться и в более широком классе случаев, т. е. в задачах, не использующих непосредственно преобразование геометрической информации. К задачам указанного типа можно отнести задачи эффективного планирования работ, суть которых состоит в следующем.

### 2. Постановка задачи

Пусть имеется множество работ  $P_i, i \in J_n$ , связанных определенной технологической последовательностью, которые необходимо выполнить в течение периода времени  $T$ . Для каждой работы  $P_i$  заданы продолжительность  $\Delta t_i$  и потребности в ресурсах различных видов  $g_i^j, i \in J_n, j \in J_k$ . На ресурсы  $G_j$  накладываются ограничения вида  $G_j \leq G_j^{\max}, j \in J_k$ . Необходимо определить моменты времени начала всех работ  $t_i, i \in J_n$ , с учетом технологической последовательности и ограничений на ресурсы таким образом, чтобы все работы были выполнены к концу планового периода и чтобы выбранный критерий достиг своего экстремального значения.

### 3. Математическая модель

Для решения данной задачи построим следующую математическую модель. Каждой работе  $P_i$  поставим в соответствие параллелепипед  $\Pi_i$  вида

$$\Pi_i = \{x \in R^{k+1} : 0 \leq x_j \leq g_i^j, j \in J_k, 0 \leq x_{k+1} \leq \Delta t_i\}. \quad (1)$$

Будем считать точку с координатами  $(0, 0, \dots, 0) \in R^{k+1}$  полюсом параллелепипеда  $\Pi_i$ . Рассмотрим параллелепипед  $\Pi_0$  следующего вида:

$$\Pi_0 = \{x \in R^{k+1} : 0 \leq x_j \leq G_j^{\max}, j \in J_k, 0 \leq x_{k+1} \leq T\}. \quad (2)$$

Длины ребер параллелепипеда  $\Pi_0$  соответствуют объемам имеющихся ресурсов  $G_j^{\max}$  и длине периода времени  $T$ . Транслируем параллелепипед вида (1) на вектор  $U^i \in R^{k+1}$ , тогда его описание примет вид

$$\Pi_i(U^i) = \{x \in R^{k+1} : 0 \leq x_j - u_j^i \leq g_i^j, j \in J_k, 0 \leq x_{k+1} - t_i \leq \Delta t_i\}. \quad (3)$$

Полюс параллелепипеда  $\Pi_i(U^i)$  находится в точке  $U^i \in R^{k+1}$ .

Разместим параллелепипеды  $\Pi_i$  в параллелепипеде  $\Pi_0$ , учитывая условия непересечения и последовательность размещения, определяемую технологической последовательностью выполнения работ  $P_i$ . Для этого укажем координаты полюса каждого параллелепипеда  $\Pi_i(U^i)$ , транслированного на вектор  $U^i, i \in J_n$ . Вектор  $U = (U^1, U^2, \dots, U^n) \in R^N$ , где  $N = (k+1) \cdot n$ , однозначно определяет размещение параллелепипедов и, следовательно, последовательность выполнения работ.

Среди всевозможных размещений параллелепипедов  $\Pi_i$ , удовлетворяющих условиям непересечения, допустимой последовательности выполнения работ и, возможно, еще каким-либо ограничениям, необходимо выбрать такое размещение, которое даст экстремум выбранному критерию. Если в качестве критерия эффективности выбран минимум времени выполнения всего комплекса работ, то математическая модель задачи сводится к модели задачи размещения параллелепипедов вида [3-5]:

$$F(U, t) = t \rightarrow \min_{U \in D \subset R^N} \quad (4)$$

$$U \in R^N, t = \max_{i \in J_n} t_i + \Delta t_i, \quad (5)$$

где  $D$  — область допустимых решений, которая описывается соотношениями  $\Phi_{ij}(U^i, U^j) \geq 0, i \in J_{n-1}, j \in J_n, i < j; \Phi_{0i}(U^0, U^i) \geq 0, i \in J_n; t_i + \Delta t_i \leq T$ .

$t_i \geq \max\{b_{ik}(t_k + \Delta t_k)\}$ ,  $i, k \in J_n$ . Здесь  $\Phi_{ij}(U^i, U^j)$  —  $\Phi$ -функция параллелепипедов  $\Pi_i(U^i)$ ,  $\Pi_j(U^j)$ ;  $\Phi_{0i}(U^0, U^i)$  —  $\Phi$ -функция параллелепипеда  $\Pi_i(U^i)$  и объекта  $\Pi_0^* = (R^{k+1} \setminus c/\Pi_0) \cup f/\Pi_0$  [6]. Отметим, что указанная математическая модель может рассматриваться как в идеализированной, так и в интервальной постановке [5, 6].

В качестве критерия оптимизации в задаче планирования работ можно выбрать также максимум эффекта от выполнения работ. В этом случае для каждого параллелепипеда  $\Pi_i(U^i)$  задается функция  $f(U^i)$ , характеризующая размещение параллелепипеда  $\Pi_i$  в точке  $(U^i)$ . Тогда критерий оптимизации представляет собой некоторую функцию от  $f(U^i)$ ,  $i \in J_n$ .

Таким образом, построенная математическая модель позволяет моделировать и решать различные задачи эффективного планирования работ в описанном классе задач методами геометрического проектирования. К данному классу задач можно отнести следующую задачу планирования работ, описанную в [7], которая возникает при долгосрочном планировании развития действующего предприятия электросвязи.

#### 4. Применение математической модели в системе поддержки принятия решений при планировании развития сети электросвязи

На предварительных этапах проектирования развития сети электросвязи сформировано множество работ, которые необходимо выполнить в течение заданного периода. Сформированные работы представляют собой агрегаты, внутри которых возможна дальнейшая декомпозиция на составные части и их распараллеливание. Предполагается, что в каждый момент времени может выполняться не более одной работы-агрегата.

После декомпозиции глобальной цели на отдельные работы (группы работ) необходимо произвести планирование их реализации в течение заданного периода, разделенного на несколько отдельных этапов. В начале каждого этапа производится выделение материальных средств для выполнения некоторого набора работ в течение этого этапа и последующих, если часть работ являются переходящими. В конце этапа определяется доход, получаемый от выполнения работ на этом этапе и предыдущих этапах. Затем этот доход распределяется (возможно, с привлечением внешних инвестиций или не полностью) между работами следующего этапа. Целью планирования является распределение работ по этапам периода развития таким образом, чтобы максимизировать доход на последнем этапе.

Необходимо построить математическую модель, позволяющую учитывать технологическую последовательность работ, разное число и продолжительность этапов реализации проекта, возможность накопления предприятием собственных средств для финансирования работ, привлечение на любом из этапов внешних инвестиций с различными способами возврата кредитов и процентов по ним. Особенностью постановки задачи является заведомо большая продолжительность планового периода по сравнению с длиной критического пути, определяемого для аналогичного списка работ методами теории управления проектами, что дает возможность гибкого построения плана в зависимости от внешних условий (схем кредитования, постоянных доходов и расходов).

Формально описанная задача представляется следующим образом. Исходными данными являются:  $n$  — количество работ;  $T$  — длительность периода развития.  $T > 0$ ;  $\Delta T = \{\Delta t_i\}$  — продолжительности выполнения работ,  $\Delta t_i > 0$ ,  $i \in J_n$ ;  $C = \{c_i\}$  — стоимости выполнения работ,  $c_i \geq 0$ ,  $i \in J_n$ ;  $m$  — количество этапов в периоде планирования, длительность этапа  $\Delta t = T/m$ ;  $B = \{b_{ik}\}$  — порядок выполнения работ, причем  $b_{ik} = 1$ , если работа  $k$  предшествует работе  $i$  и  $b_{ik} = 0$  в противном случае,  $i, k \in J_n$ ;  $s_0$  — фиксированные доходы в начале каждого этапа;  $e_0$  — фиксированные расходы в конце каждого этапа;  $W = \{w_i\}$  — единовременный доход от выполнения  $i$ -й работы,  $w_i \geq 0$ ,  $i \in J_n$ ;  $V = \{v_i\}$  — средний постоянный доход на каждом этапе от выполнения  $i$ -й работы,  $v_i \geq 0$ ,  $i \in J_n$ ;  $E = \{e_i\}$  — средние дополнительные затраты на каждом этапе при выполнении  $i$ -й работы,  $i \in J_n$ ;  $R_0 \geq 0$  — стартовый капитал в начале периода.

Переменными модели являются:  $T = \{t_i\}$  — моменты начала работ,  $t_i \geq 0$ ,  $i \in J_n$ ;  $S = \{s_j\}$  — дополнительные средства, привлекаемые в начале этапов,  $s_j \geq 0$ ,  $j \in J_m$ .

Ограничения модели являются:  $t_i + \Delta t_i \leq T$ ,  $i \in J_n$  — все работы должны завершиться к концу периода;  $t_i \geq \max\{b_{ik}(t_k + \Delta t_k)\}$ ,  $i, k \in J_n$  — все работы должны выполняться в технологической последовательности;  $R_j \geq 0$ ,  $j \in J_m$  — сумма средств на каждом этапе должна быть неотрицательной, с учетом кредитов; проценты по кредитам должны быть возвращены к концу периода или невозвращенный остаток вычитается из суммы последнего этапа.

Конкретизируем модель (4)–(5) для приведенной выше задачи планирования. Поскольку в задаче все ресурсы выражены в денежном эквиваленте, т. е.  $k = 1$ , то каждой работе  $P_i$  можно поставить в соответствие прямоугольник  $\Pi_i \subset R^2$ , соответствующий параллелепипеду (1) вида

$$\Pi_i = \{x \in R^2: 0 \leq x_1 \leq c_i, 0 \leq x_2 \leq \Delta t_i\}. \quad (6)$$

Его длина равна продолжительности работы  $\Delta t_i$ , а высота — стоимости выполнения работы  $c_i$ . Параллелепипеду  $\Pi_0$  вида (2) соответствует прямоугольник

$$\Pi_0 = \{x \in R^2: 0 \leq x_1 \leq C_{\max}, 0 \leq x_2 \leq T\}. \quad (7)$$

Период планирования  $T$  разбит на  $m$  одинаковых этапов, которые влияют на оценку эффекта от выполнения работ и не ограничивают установление сроков начала и окончания работ. Возможность привлечения дополнительных ресурсов  $s_j$  на  $j$ -м этапе позволяет нарушить ограничение и увеличить высоту прямоугольника  $\Pi_0$  (или уменьшить высоту прямоугольника  $\Pi_j$ ) в пределах  $j$ -го этапа. В связи с тем, что на предварительном этапе работы агрегированы и в каждый момент времени может выполняться только одна работа-агрегат, прямоугольники  $\Pi_i$  размещаются в прямоугольнике  $\Pi_0$  в одну линию. Трансляции прямоугольников  $\Pi_i$  вида (6) выполняются только в одном направлении, вектор трансляций  $U^i$  в этом случае определяется значением  $t_i, U^i = (0, t_i) \in R^2$ . В результате трансляции получим прямоугольник вида:

$$\Pi_i(U^i) = \{x \in R^2: 0 \leq x_1 \leq c_i, 0 \leq x_2 - t_i \leq \Delta t_i\}. \quad (8)$$

Для каждого прямоугольника  $\Pi_i(U^i)$  определим функцию  $f_j(t_i, \Delta t_i, s_j)$  — эффект от размещения полуса прямоугольника  $\Pi_i$  в точке  $(0, t_i)$  на  $j$ -м этапе. В соответствии с условием задачи, под эффектом  $j$ -го этапа понимается сумма средств, полученных на этом этапе, которая может быть потрачена или накоплена на последующих этапах. Целевая функция представляет собой максимизацию эффекта последнего этапа.

Таким образом, рассматриваемый вариант задачи планирования работ в терминах геометрического проектирования может быть представлен следующим образом. Разместить прямоугольники  $\Pi_i, i \in J_n$ , вида (6) в прямоугольнике  $\Pi_0$  вида (7) с учетом заданной последовательности при условии непересечения таким образом, чтобы функция  $f_m(t_n, \Delta t_n, s_m)$  приняла максимальное значение.

Математическая модель задачи примет следующий вид:

$$F(U, t) = f_m(t_n, \Delta t_n, s_m) = K_m \rightarrow \max_{(U, S) \in D \subset R^{N+m}}, \quad (9)$$

$$U \in R^N, t = \max_{i \in J_n} t_i + \Delta t_i, \quad (10)$$

где  $N = 2n, S = (s_1, s_2, \dots, s_m) \in R^m, D$  — область допустимых решений, которая описывается соотношениями

$$\Phi_y(U^i, U^j) \geq 0, i \in J_{n-1}, j \in J_n, i < j, \quad (11)$$

$$\Phi_{0i}(U^0, U^i) \geq 0, i \in J_n, \quad (12)$$

$$t_i + \Delta t_i \leq T, \quad (13)$$

$$t_i \geq \max\{b_{ik}(t_k + \Delta t_k)\}, i, k \in J_n, \quad (14)$$

$$R_j \geq 0, j \in J_m. \quad (15)$$

Здесь  $\Phi_y(U^i, U^j)$  —  $\Phi$ -функция прямоугольников  $\Pi_i(U^i), \Pi_j(U^j)$  вида (8),  $\Phi_{0i}(U^0, U^i)$  —  $\Phi$ -функция параллелепипеда  $\Pi_i(U^i)$  и объекта  $\Pi_0^* = (R^2 \setminus \text{cl} \Pi_0) \cup \text{fr} \Pi_0$ . Функция  $f_j(t_i, \Delta t_i, s_j)$  с учетом условия задачи примет вид:

$$f_j(t_i, \Delta t_i, s_j) = R_j = R_{j-1} + (s_0 - e_0) + \sum_{i=1}^n a_i^{(1)} \left( w_i + \frac{v_i}{2} - \frac{e_i}{2} \right) + \sum_{i=1}^n a_i^{(2)} \left( w_i + \frac{v_i}{2} - c_i - \frac{e_i}{2} \right) + \sum_{i=1}^n a_i^{(3)} (v_i - e_i) + \sum_{i=1}^n a_i^{(4)} (-c_i) + s_j + \sum_{y=1}^{j-1} \sum_z K_{yz}, \quad (16)$$

где

$$a_i^{(1)} = \begin{cases} 1 & \text{если } t_i < \Delta t_i \cdot (j-1) \\ & \text{и } \Delta t_i \cdot (j-1) < t_i + \Delta t_i \leq \Delta t_i \cdot j \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases} \dots$$

— работа начата на этапе до  $j$ , закончена на  $j$ -м этапе;

$$a_i^{(2)} = \begin{cases} 1 & \text{если } t_i \geq \Delta t_i \cdot (j-1) \text{ и } t_i + \Delta t_i \leq \Delta t_i \cdot j \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

— работа начата и закончена на  $j$ -м этапе;

$$a_i^{(3)} = \begin{cases} 1 & \text{если } t_i + \Delta t_i < \Delta t_i \cdot (j-1) \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

— работа начата и закончена на этапе до  $j$ ;

$$a_i^{(4)} = \begin{cases} 1 & \text{если } \Delta t_i \cdot (j-1) \leq t_i < \Delta t_i \cdot j \text{ и } t_i + \Delta t_i > \Delta t_i \cdot j \\ 0 & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

— работа начата на  $j$ -м этапе и будет закончена на этапе после  $j$ ;

$K_{yz}$  — функция, определяющая для  $j$ -го этапа порядок выплаты  $z$ -го кредита, полученного на  $y$ -м этапе. Характеризует возврат внешних инвестиций за предыдущие  $(j-1)$  этапов.

Функция (16) эффекта  $j$ -го этапа не является гладкой, вид функции  $K_{yz}$  зависит от конкретной ситуации на рынке банковских услуг.

Для решения задачи (9) (10) выберем методы комплексов и штрафных функций, поскольку они хорошо проявляют себя на функциях сложного вида [8]. Метод штрафных функций удачно справляется с «ображным» эффектом, а метод комплексов показывает быструю сходимость. Выбранные методы предусматривают генерацию стартовой точки, удовлетворяющей системе ограничений.

Традиционно задачи планирования решаются с использованием аппарата теории управления проектами [9]. Однако в данной постановке задача имеет особенности, позволяющие применить для ее решения

ный подход: максимизируется эффект последнего этапа; период развития заведомо длиннее критического пути реализуемого проекта; производится перераспределение средств после каждого этапа; учитываются доходы и расходы от выполнения работ; возможность привлечения внешних средств на любом из этапов: на этапах происходит накопление денег для последующего вложения в производство.

Тем не менее, при расчетах используются элементы традиционных методов календарного планирования. Это необходимо для определения ранних и поздних сроков начала работ с целью корректного задания диапазонов изменения переменных  $t_i$ .

Математическая модель (9)–(15) и метод решения задачи планирования работ реализованы программно и включены в комплекс программы «Феодосийский вариант-32», предназначенный для решения задач проектирования, эксплуатации и развития проводных сетей электросвязи. Данный комплекс программы в настоящее время используется в подразделениях ОАО «Укртелеком».

### 5. Заключение

Отличие рассмотренной в статье задачи планирования работ от традиционных задач календарного планирования привело к необходимости построения новой математической модели и привлечения аппарата теории геометрического проектирования.

Построенная в работе математическая модель задачи эффективного планирования работ и приве-

денные методы ее анализа могут быть использованы при разработке интеллектуальных систем поддержки принятия решений, ориентированных на различные предметные области, в которых применяются указанные подходы.

Список литературы: 1. *Танаев В. С., Шкурба В. В.* Введение в теорию расписаний. — М.: Наука, 1975. — 256 с. 2. *Стоян Ю. Г., Яковлев С. В.* Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования. — К.: Наук. думка, 1986. — 268 с. 3. *Стоян Ю. Г., Галата А. Я.* О плотной упаковке параллелепипедов произвольных размеров в параллелепипеде наименьшего объема // Кибернетика. — 1972. — № 2. — С. 81–86. 4. *Stoyan Yu. G., Yaskov G. N.* Mathematical Model and Solution Method of Optimization Problem of Placement of Rectangles and Circles taking into account Special Constraints // Int. Trans. Opr. Res. — 1998. — No. 1. — P. 45–57. 5. *Новожилова М. В., Романова Т. Е.* Фактор неопределенности временного параметра при управлении проектами // Проблемы машиностроения. — 2001. — Т. 4, № 3–4. — С. 79–84. 6. *Романова Т. Е.* Математическая модель оптимизационной задачи размещения параллелепипедов с учетом погрешностей исходных данных // Радиоэлектроника и информатика — 2002. — № 2. — С. 42–45. 7. *Гребенник И. В., Хабаров А. Ю.* Модель задачи эффективного планирования работ на заданный период // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. — 2003. — Вып. 123. — С. 44–53. 8. *Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсел К.* Оптимизация в технике: В 2-х кн. — М.: Мир, 1986. — Кн. 2. — 320 с. 9. *Таха Х. А.* Введение в исследование операций: В 2-х кн. — М.: Мир, 1985. — Кн. 2. — 496 с.

Поступила в редколлегию 12.09.2006

УДК 004.932.2.001.36:519.7

С. Н. Герасин, В. В. Шляхов

## АКСИОМАТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ МЕТРИКИ В СУБЪЕКТИВНЫХ ПРОСТРАНСТВАХ

### 1. Введение

Метод компараторной идентификации, основанный на изучении свойств бинарных отношений, позволяет выявить структуру неизвестного преобразования с точностью до взаимно однозначного отображения. Известно [1], что с точки зрения построения математической модели «черного ящика» этого вполне достаточно, поскольку речь идет об изоморфизме моделей, а невозстанавливаемая взаимно однозначная часть представляет собой некую шкалу, выбор которой во многих реальных задачах может быть произвольным.

Вместе с тем, на практике часто знание шкалы необходимо. К подобному выводу несложно прийти, проанализировав круг задач, возникающих в теории измерений, экономике, психофизике и во многих других областях [2].

Когда речь идет о преобразованиях линейного пространства в  $R_n$ , как правило, полезнейшая взаимно однозначная часть по сути дела искривляет  $n$ -мерное арифметическое пространство. Еще раз подчеркнем: на базе бинарных отношений это искривление найти невозможно, более того, его нельзя даже «уловить», т. е. установить сам факт его присутствия. Однако идеология компараторного метода может быть сохранена и распространена на случай  $n$ -арных отношений. При таком подходе поставленная выше задача может быть решена. Ее решение, практически важное в психофизике, экономике и некоторых других областях, является целью настоящего исследования.

На примере психофизической системы «орган зрения человека» сформулируем некоторые положения, предшествующие формальной постановке задачи.

Рассмотрим процесс распознавания цветов. Многочисленные исследования в области психофизики, в совокупности с методом компараторной идентификации, позволили в настоящее время прийти к выводу о так называемой трехкомпонентной модели распознавания цветов [3]. Цвет может быть охарактеризован тремя числами  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ , а все множество цветов представляет собой некоторую область (цветовой треугольник) в  $R_3$ . Сама процедура распознавания может быть описана в виде следующей математической модели [3]:

$$\alpha_i(x(\lambda)) = \varphi_i \left( \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \beta_i(\lambda)x(\lambda)d\lambda \right), \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где  $x(\lambda)$  — функция яркости в зависимости от длины волны (математическая модель подаваемого излучения),  $\beta_i(\lambda)$  — функции спектральной чувствительности,  $[\lambda_1, \lambda_2]$  — участок видимого спектра и  $\varphi_i$  — взаимно однозначные отображения из  $R$  в  $R$ .

Трехкомпонентную модель цветового зрения можно охарактеризовать как суперпозицию двух преобразований  $F: L_2[\lambda_1, \lambda_2] \rightarrow R_3$  — линейного оператора и  $\varphi: R_3 \rightarrow R_3$  — взаимно однозначного отображения. При этом нетрудно заметить, что отображение  $\varphi$  будет изменять метрические свойства пространства, т. е. его искривлять. На базе бинарных отношений эти изменения уловить не удастся. Однако есть возможность работать с параметрами цветов (четырёхместными предикатами), фиксируя в опыте субъективные равенства расстояний между ними. В психофизике подобные эксперименты описаны в работах [4, 5]. Более того, испытуемый достаточно точно находит среднюю точку отрезка, соединяющего два цвета, если их воспринимать как элементы  $R_3$ . Такое половинное деление, как будет показано ниже, позволяет уловить изменения пространства под действием отображения  $\varphi$ .

Суммируя эти факты, мы можем обобщить ситуацию на  $n$ -мерный случай и перейти к формальной постановке задачи.

### 2. Свойства метрических предикатов и операций в субъективном пространстве

Будем считать, что изменение метрических свойств происходит следующим образом. Новая метрика  $\rho^*(x, y)$  определяется равенством

$$\rho^*(x, y) = \rho(\varphi(x), \varphi(y)), \quad (2)$$

где  $x, y \in R_n$ ,  $\varphi: R_n \rightarrow R_n$  — взаимно однозначное соответствие,  $\rho$  — евклидова метрика.

*Определение 1.* Четырёхместный предикат  $\Phi(x, y, u, v)$ , заданный на  $R_n$ , будем называть *метрическим*, если он имеет вид

$$\Phi(x, y, u, v) = D(\rho(\varphi(x), \varphi(y)), \rho(\varphi(u), \varphi(v))), \quad (3)$$

где  $D$  — предикат равенства на  $R$ , а остальные элементы (3) определяются соотношением (2) при условии, что  $\varphi: R_n \rightarrow R_n$  — гомеоморфизм.

Знание характеристических свойств метрических предикатов позволяет решать поставленную в начале задачу. Изучение этих свойств будет рассмотрено ниже.

Рассмотрим четырёхместный предикат  $\Phi(x, y, u, v)$ , заданный на  $R_n$  и обладающий следующим набором свойств:

1. Парная эквивалентность:

- а)  $\Phi(x, y, x, y) = 1$  — парная рефлексивность;
- б)  $\Phi(x, y, u, v) = 1 \Rightarrow \Phi(u, v, x, y) = 1$  — парная симметричность;
- в)  $\left. \begin{matrix} \Phi(x, y, u, v) = 1 \\ \Phi(x, y, f, g) = 1 \end{matrix} \right\} \Rightarrow \Phi(u, v, f, g) = 1$  — парная транзитивность.

2. Внутренняя симметрия:

$$\Phi(x, y, u, v) = 1 \Rightarrow \Phi(y, x, v, u) = 1.$$

3. Неподвижность:

$$\Phi(x, x, y, z) = 1 \Rightarrow y = z.$$

Введем в рассмотрение множество  $S(x, y)$  отношением

$$S(x, y) = \{z: \Phi(y, x, x, z) = 1\}. \quad (4)$$

Заметим, что из парной рефлексивности следует: для произвольных  $x, y$  множества  $S(x, y) \neq \emptyset$ , поскольку  $\Phi(y, x, x, y) = 1$ , т. е.  $y \in S(x, y)$ . Очевидно, что  $\{x, x\} = \{x\}$  состоит из одного вектора. Действительно, если  $x_1 \in S(x, x)$ , то  $\Phi(x, x, x, x_1) = 1$  и из неподвижности следует  $x_1 = x$ .

Предположим, что предикат  $\Phi(x, y, u, v)$  таков, что множества  $S(x, y)$ , индуцируемые этим предикатом, удовлетворяют ряду условий (мы будем называть их аксиомами).

**Аксиома внутреннего равноделения (АВНР).** Для произвольных  $x, y \in R_n$  найдется единственный вектор  $u$ , для которого множество  $S(x, u) \cap S(y, u)$  состоит из одного вектора.

**Аксиома внешнего равноделения (АВШР).** Для произвольных  $x, y \in R_n$  найдется единственный вектор  $v$ , для которого множество  $S(x, v) \cap S(y, v)$  состоит из одного вектора.

**Аксиома четырехугольника (АЧ).** Для произвольных  $x, y, u, v \in R_n$  имеет место: если вектора  $\omega, \omega', \hat{\omega}, \hat{\omega}'$  таковы, что множества  $S(x, \omega) \cap S(y, \omega)$ ,  $S(u, \hat{\omega}) \cap S(v, \hat{\omega})$ ,  $S(x, \omega') \cap S(u, \omega')$ ,  $S(y, \hat{\omega}') \cap S(v, \hat{\omega}')$  состоят из одного вектора, то множество  $S(\hat{\omega}, z) \cap S(\hat{\omega}', z)$  состоит тоже из одного вектора.

Формулировки аксиом внутреннего и внешнего равноделения позволяют ввести операции внутреннего и внешнего равноделения для произвольной пары векторов  $x, y \in R_n$ .

**Определение 2.** Операцией внутреннего равноделения для векторов  $x, y$ , которую будем обозначать  $x \cdot y$ , назовем вектор  $u$ , для которого множество  $S(x, u) \cap S(y, u)$  состоит из одного вектора.

**Определение 3.** Операцией внешнего равноделения для векторов  $x, y$ , которую будем обозначать  $x \angle y$  назовем вектор  $v$ , для которого множество  $S(x, v) \cap S(y, v)$  состоит из одного вектора.

Корректность этих определений обеспечивается выполнением аксиом АВНР и АВШР.

Ближайшая задача будет состоять в том, чтобы показать, что на базе операций  $x \cdot y$  и  $x \angle y$  можно в  $R_n$  задать структуру линейного пространства, в общем случае отличающуюся от структуры  $R_n$ . Для ее реализации остановимся сначала на некоторых свойствах введенных выше операций.

$$1. x \cdot x = x \text{ и } x \angle x = x.$$

**Доказательство.** Ранее было установлено, что  $S(x, x) = \{x\}$ . Тогда из определений вытекают требуемые равенства.

$$2. x \cdot y = y \cdot x.$$

**Доказательство.** Вытекает из определения.

3.  $(x \cdot y) \cdot (u \cdot v) = (x \cdot u) \cdot (y \cdot v)$  — свойство четырехугольника (СЧ).

**Доказательство.** Это свойство следует из АЧ. Действительно, пусть  $x \cdot y = w$ ,  $u \cdot v = \omega$ ,  $w \cdot \omega = z$ ,  $x \cdot u = \hat{w}$  и  $y \cdot v = \hat{\omega}$ . Тогда выполняются условия АЧ, следовательно,  $S(\hat{w}, z) \cap S(\hat{\omega}, z)$  состоит из одного вектора и  $z = \hat{w} \cdot \hat{\omega}$  а это означает выполнение свойства четырехугольника.

$$4. x \cdot (x \angle y) = y \text{ и } x \angle (x \cdot y) = y.$$

**Доказательство.** Пусть  $x \angle y = u$ ,  $x \cdot u = v$ . Тогда из этих равенств следует, что множества  $S(x, y) \cap S(u, y)$  и  $S(x, v) \cap S(u, v)$  состоят из одного вектора. С другой стороны, из АВНР следует, что для  $x$  и  $y$  найдется единственный вектор  $z$ , для которого  $S(x, z) \cap S(u, z)$  — одноэлементно. Значит,  $y = v = z$ . Или  $x \cdot (x \angle y) = y$ . Второе равенство доказывается аналогично.

**Следствие.** Уравнения вида  $x \cdot z = y$  и  $x \angle z = y$  относительно  $z$  имеют единственное решение вида  $z = x \angle y$  и  $z = x \cdot y$  соответственно.

$$5. z \angle (x \cdot y) = (z \angle y) \text{ и } z \cdot (x \angle y) = (z \cdot x) \angle (z \cdot y).$$

**Доказательство.** Рассмотрим  $x \cdot y$ . С одной стороны, из свойства 4 имеем

$$x \cdot y = z \cdot [z \angle (x \cdot y)].$$

С другой стороны, из этого свойства и свойства четырехугольника следует

$$x \cdot y = [z \cdot (z \angle x)] \cdot [z \cdot (z \angle y)] = (z \cdot z) \cdot [(z \angle x) \cdot (z \angle y)] = z \cdot [(z \angle x) \cdot (z \angle y)].$$

Тогда из следствия свойства 4 вытекает

$$z \angle (x \cdot y) = (z \angle x) \cdot (z \angle y).$$

Для доказательства второго равенства рассмотрим  $z \cdot y$ . Тогда, используя рассуждения, аналогичные предыдущим, можно выписать цепочки

$$z \cdot y = (z \cdot z) \cdot [z \cdot (x \angle y)] = (z \cdot x) \cdot [z \cdot (x \angle y)],$$

$$z \cdot y = (z \cdot x) \cdot [(z \cdot x) \angle (z \cdot y)].$$

Отсюда

$$z \cdot (x \angle y) = (z \cdot x) \angle (z \cdot y).$$

$$6. (x \angle y) \angle y = x.$$

**Доказательство.** Пусть  $x \angle y = z$ , тогда  $y = x \cdot z$ , следовательно,  $(x \angle y) \angle y = z \angle (z \cdot x) = x$ .

7.  $(x \angle y) \cdot (y \angle x) = (x \cdot y)$ .

*Доказательство.* Из свойства 5 вытекает следующая цепочка равенств

$$\begin{aligned} (x \angle y) \cdot (y \angle x) &= [(x \angle y) \cdot y] \angle [(x \angle y) \cdot x] = \\ &= [(x \cdot y) \angle y] \angle [(y \cdot y) \angle [x \cdot (x \angle y)]] = \\ &= [(x \cdot y) \angle y] \angle y = (x \cdot y). \end{aligned}$$

Прямым следствием доказанного свойства является свойство 8.

8.  $x \angle y = (y \angle x) \angle (x \cdot y)$ .

9.  $(x \angle y) \angle x = x \angle (y \angle x)$ .

*Доказательство.* Рассмотрим  $x \angle (y \angle x)$ . Из свойства 8 следует

$$\begin{aligned} x \angle (y \angle x) &= x \angle [(x \angle y) \angle (x \cdot y)] = \\ &= x \angle \{[(x \angle y) \angle x] \cdot [(x \angle y) \angle y]\} = \\ &= x \angle [x \cdot \{(x \angle y) \angle x\}] = (x \angle y) \angle x. \end{aligned}$$

Доказанные свойства операций внутреннего и внешнего равноделения дают возможность обосновать утверждение о том, что на  $R_n$  при помощи предиката  $\Phi$  может быть задана структура линейного пространства. Для этого введем операции сложения векторов и умножения вектора на действительное число.

*Определение 4.* Суммой двух векторов  $x$  и  $y$  назовем третий вектор  $z$ , который связан с  $x$  и  $y$  следующим равенством

$$z = x + y = e \angle (x \cdot y), \quad (5)$$

где  $e \in R_n$  — фиксированный вектор.

*Примечание.* Несложно догадаться, что вектор  $e$  выполняет роль «нулевого» вектора (это будет показано ниже), а произвольность в его выборе аналогична произвольности в выборе начала координат.

*Лемма.* Относительно введенной операции сложения множество векторов образуют абелеву группу.

*Доказательство.* Для доказательства леммы необходимо проверить выполнение свойств абелевой группы.

Сразу заметим, что  $x + y = y + x$ , т. е. операция коммутативна. Это следует из определения и из равенства  $x \cdot y = y \cdot x$ .

Докажем, что в качестве «нуля» выступает вектор  $e$ . Например, рассмотрим  $x + e$ . Тогда из определения и свойства 4 можно записать

$$x + e = e \angle (x \cdot e) = e \angle (e \cdot x) = x.$$

Таким образом, «нулевой» элемент существует.

Докажем существование обратного элемента. Рассмотрим уравнение относительно  $y$ :  $x + y = e$ , оно эквивалентно  $e \angle (x \cdot y) = e$  или  $x \cdot y = e$ .

С учетом следствия свойства 4 можем найти единственное решение последнего уравнения в виде

$y = x \angle e$ . Это равенство и определяет обратный элемент, который в дальнейшем будем обозначать  $-x$ , т. е.

$$-x = x \angle e. \quad (6)$$

Наконец покажем, что операция сложения ассоциативна. Из определения и равенства  $z + e = e$  можно записать:

$$(x + y) + z = (x + y) + (z + e) = e \angle [(x + y) \cdot (z + e)].$$

Воспользуемся свойством 5, тогда

$$\begin{aligned} e \angle [(x + y) \cdot (z + e)] &= e \angle \{[e \angle (x)] \cdot [e \angle (z + e)]\} = \\ &= e \angle \{e \angle [(x \cdot y) \cdot (z + e)]\}. \end{aligned}$$

Из свойства четырехугольника следует

$$(x \cdot y) \cdot (z + e) = (x \cdot e) \cdot (y \cdot z).$$

Но тогда справедлива следующая цепочка равенств

$$\begin{aligned} e \angle \{e \angle [(x \cdot y) \cdot (z + e)]\} &= e \angle \{e \angle [(x \cdot e) \cdot (y \cdot z)]\} = \\ &= e \angle \{[e \angle (x \cdot e)] \cdot [e \angle (y \cdot z)]\} = e \angle [x \cdot (y + z)] = x + (y + z). \end{aligned}$$

Таким образом,

$$(x + y) + z = x + (y + z). \quad (7)$$

Ассоциативность доказана. На этом завершается доказательство леммы.

Теперь приступим к введению операции умножения вектора на действительное число.

Сначала определим  $2x$  и  $\frac{x}{2}$ . Поскольку эти операции индуцируются операцией сложения, введем некоторые определения.

*Определение 5.*  $2x = x + x$ ; вектор  $z = \frac{x}{2}$  тогда и только тогда, когда  $z + z = 2z = x$ .

Непосредственно из определений суммы вытекает  $2x = e \angle x$ ,  $\frac{x}{2} = e \cdot x$ .

Далее мы можем определять умножение вектора на число  $\lambda = 2^k$  — степень двойки как суперпозицию преобразования  $2x$ , если  $k > 0$  и  $-\frac{x}{2}$ , если  $k < 0$ .

*Определение 6.*

$$\underbrace{2^k x = 2(2(\dots(2x)\dots))}_{k \text{ двоек}}, \quad \underbrace{2^{-k} x = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}(\dots(\frac{1}{2}x)\dots))}_{k \text{ раз } \frac{1}{2}}. \quad (8)$$

*Определение 7.*

$$(2^k + 2^e)x = 2^k x + 2^e x. \quad (9)$$

Далее заметим, что  $-2x = 2(-x)$ . Действительно, из (6) и определения 5 следует

$$2(-x) = 2(x \angle e) = e \angle (x \angle e).$$

С учетом свойства 9 имеем

$$e \angle (x \angle e) = (e \angle x) \angle e = 2x \angle e = -2x.$$

Аналогично  $\frac{-x}{2} = -\frac{x}{2}$ , поскольку из определений и свойств вытекает следующая цепочка равенств

$$\begin{aligned} \frac{-x}{2} &= \frac{xLe}{2} = e \cdot (xLe) = (e \cdot x) \angle (e \cdot e) = \\ &= (e \cdot x) \angle e = -(e \angle x) = -\frac{x}{2}. \end{aligned}$$

Отсюда, для любой степени 2 имеем

$$2^k(-x) = -2^k x. \quad (10)$$

Теперь докажем, что при любом целом  $k$  имеет место

$$2^k x + 2^k y = 2^k(x + y). \quad (11)$$

Заметим, что из определения 6 вытекает

$$2^k(2^e x) = 2^{k+e} x. \quad (12)$$

Пусть  $k = 1$ . Тогда

$$\begin{aligned} 2x + 2y &= (x + x) = (y + y) = \\ &= (x + y) + (x + y) = 2(x + y). \end{aligned}$$

Индукцией по  $k > 0$  получим

$$\begin{aligned} 2^{k+1} x + 2^{k+1} y &= 2^k(2x) + 2^k(2y) = \\ &= 2^k(2x + 2y) = 2^k(2(x + y)) = 2^{k+1}(x + y). \end{aligned}$$

Это свойство доказывается аналогичным образом, когда  $k < 0$ . Таким образом, имеет место равенство (11). Из (10) и (11) вытекает, что

$$2^k x - 2^k y = 2^k(x - y).$$

В итоге мы получили, что если число двоично-рациональное, то есть

$$\lambda = \sum_{k=-n}^m \alpha_k 2^k, \text{ где } \alpha_k \in \{-1, 0, 1\}.$$

операция  $\lambda x$  определяется равенством

$$\lambda x = \sum_{k=-n}^m \alpha_k 2^k x, \quad (13)$$

при этом если  $\alpha_k = -1$ , то  $-2^k x = 2^k(-x)$ .

Докажем еще два свойства, которые нам понадобятся в дальнейшем.

*Свойство I:*

$$(-x) + (-y) = -(x + y). \quad (14)$$

Из определений  $-x$  и  $-y$  имеем

$$\begin{aligned} (-x) + (-y) &= e \angle [(xLe) \cdot (yLe)] \\ &= -(x + y) = [e \angle (x \cdot y)] \angle e. \end{aligned}$$

Применяя свойство 9 к выражению  $[e \angle (x \cdot y)] \angle e$ , получим

$$-(x + y) = e \angle [(x \cdot y) \angle e],$$

откуда вытекает, что равенство (14) имеет место, если

$$(xLe) \cdot (yLe) = (x \cdot y) \angle e. \quad (15)$$

Докажем последнее равенство. Учитывая, что  $e \cdot e = e$  и  $x \cdot (xLe) = e$ , запишем:

$$[x \cdot (xLe)] \cdot [y \cdot (yLe)] = e.$$

Применим к левой части свойство четырехугольника:

$$(x \cdot y) \cdot [(xLe) \cdot (yLe)] = e,$$

отсюда

$$(x \cdot y) \angle [(x \cdot y) \cdot [(xLe) \cdot (yLe)]] = (x \cdot y) \angle e$$

или

$$(xLe) \cdot (yLe) = (x \cdot y) \angle e.$$

То есть выполняется (15), а значит, и (14).

*Свойство II:*

$$-(-x) = x. \quad (16)$$

Действительно,

$$-(-x) = (xLe) \angle e.$$

Значит, (16) выполняется, когда  $(xLe) \angle e = x$ , но тогда  $(xLe) \cdot [(xLe) \angle e] = (xLe) \cdot x$  или  $e = (xLe) \cdot x$  и  $e = e$ .

Выполнив построенную цепочку преобразований в обратном порядке, получим (16).

Суммируя сказанное, можно подвести следующий итог. Авторами введена операция умножения вектора  $x$  на двоично-рациональное число по формуле

$$\lambda x = \sum_{k=-n}^m \alpha_k (2^k x) \quad (17)$$

с выполненнем следующих свойств:

$$2^k(x + y) = 2^k x + 2^k y. \quad (18)$$

$$2^k(2^e x + y) = 2^{k+e} x + 2^k y, \quad (19)$$

$$-(2^k x) = 2^k(-x), \quad (20)$$

$$-(x + y) = (-x) + (-y). \quad (21)$$

$$-(-x) = x. \quad (22)$$

По существу, тем самым определена структура линейного пространства.

### 3. Условия существования метрического предиката

Допустим, в  $R_n$  задан метрический предикат  $\Phi(x, y, u, v)$  вида (3). Тогда для любых  $x, y \in R_n$  индуцируется множество  $S(x, y)$ , определенное в равенстве (4). Это множество представляет собой сферу в  $R_n$  радиуса  $r(x, y) = \rho(\Phi(x, y))$  с центром в точке  $\varphi(x)$ . Поскольку  $\Phi$  осуществляет взаимно однозначное соответствие, то определенные в предыдущей части аксиомы внутреннего и внешнего равенства имеют место для метрического предиката. Причем непосредственно легко убедиться в том, что индуцируемые этими аксиомами операции  $x \cdot y$  и  $x \angle y$  имеют вид:

$$x \cdot y = \varphi^{-1} \left( \frac{\varphi(x) + \varphi(y)}{2} \right), \quad (23)$$

$$x \angle y = \varphi^{-1} (2\varphi(y) - \varphi(x))$$

Из равенств (23) вытекает аксиома четырехугольника. Рассмотрим для произвольных  $x, y, u, v \in R_n$

выражение  $x \cdot y \cdot (u \cdot v)$ . Тогда имеет место следующая цепочка равенств

$$\begin{aligned} x \cdot y \cdot (u \cdot v) &= \varphi^{-1} \left( \frac{\varphi(x \cdot y) + \varphi(u \cdot v)}{2} \right) = \\ &= \varphi^{-1} \left[ \frac{\varphi \left( \varphi^{-1} \left( \frac{\varphi(x) + \varphi(y)}{2} \right) \right) + \varphi \left( \varphi^{-1} \left( \frac{\varphi(u) + \varphi(v)}{2} \right) \right)}{2} \right] = \\ &= \varphi^{-1} \left( \frac{\varphi(x \cdot u) + \varphi(y \cdot v)}{2} \right) = (x \cdot u) \cdot (y \cdot v), \end{aligned}$$

а это и означает выполнение аксиомы четырехугольника.

Далее заметим, что непосредственная проверка дает возможность утверждать выполнение аксиом парной эквивалентности, внутренней симметрии и неподвижности для метрического предиката. Отсюда следует, что операции, определенные равенствами (23), обладают всеми свойствами, доказанными ранее, а для самого метрического предиката еще имеет место аксиома непрерывности, так как  $\varphi$  — гомеоморфизм. Таким образом, можем сделать вывод, что метрический предикат индуцирует новую линейную структуру на  $R_n$ .

**Теорема.** Метрический предикат вида (3) обладает следующим набором свойств: парной эквивалентностью, внутренней симметрией, неподвижностью, аксиомами внутреннего и внешнего равноделения, четырехугольника и непрерывности. Этот набор свойств позволяет определить относительно  $R_n$  линейную структуру, для которой гомеоморфизм  $\varphi$  яв-

ляется изоморфизмом с изначально заданной линейной структурой, если в качестве элемента  $e$  в определении 4 будет взят элемент  $e^*$ , для которого  $\varphi(e^*) = 0$ .

Близкие по существу вопросы обсуждались в работе [6].

#### 4. Выводы

В статье введено понятие метрического предиката, при помощи которого можно осуществлять шкалирование субъективных образов различных сенсорных систем. Определены метрические операции и характеристические свойства соответствующих метрических предикатов, индуцирующих структуру метрического пространства входных сигналов.

Найдены условия существования метрических предикатов, однозначно определяемые системой характеристических свойств.

**Список литературы:** 1. Шабанов-Кушнарченко Ю. П. Теория интеллекта: Проблемы и перспективы: Т. 3. — Харьков: Вища школа, 1987. — 158 с. 2. Бондаренко М. Ф., Шабанов-Кушнарченко С. Ю. Теория цветового зрения. — Харьков: Фактор-Друк, 2002. — 206 с. 3. Луизов А. В. Глаз и свет. — Л.: Энергоатомиздат, 1989. — 140 с. 4. Шабанов-Кушнарченко Ю. П., Ревичов В. Л., Мурашко А. Г. Математичні моделі зору. — К.: Техніка, 1966. — 95 с. 5. Ивкс Р. М. Введение в теорию цвета. — М.: Мир, 1964. — 442 с. 6. Шабанов-Кушнарченко Ю. П., Шляхов В. В. Об одном способе задания структуры линейного пространства на языке отношений // АСУ и приборы автоматиз. — 1990. — Вып. 96. — С. 111–117.

Поступила в редакцию 27.10.2006

УДК 519.6

В. И. Бритик, Е. А. Байдинова

**АЛГОРИТМ ОБУЧЕНИЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ МНОГОМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ****1. Введение**

Распознавание образов является одной из актуальных задач в различных сферах жизнедеятельности общества: в биологии, геологии, социологии, астрономии, медицине и прочих областях [1]. В зависимости от цели, задачу распознавания можно представить как задачу:

- 1) классификации объектов;
- 2) поиска и идентификации объекта.

Задача классификации предусматривает наличие набора статистически достоверных признаков, характеризующих исследуемое множество объектов. Решение данной задачи заключается в поиске границ областей, образуемых подмножествами множества исследуемых объектов, которые обладают свойством общности (подобности) признаков. Случай, когда результатом классификации является множество непересекающихся областей (классов) по каждому характерному признаку, является идеальным. Однако при решении реальных задач классификации эта ситуация далеко не всегда имеет место.

Наличие пересекающихся классов, полученных в процессе классификации, ставит перед исследователями дополнительные вопросы относительно поиска отличительных признаков объектов из области пересечения, которые являются причиной неопределенности результатов классификации. Поиск вышеуказанных признаков, т. е. поиск отличий объектов, представляет собой задачу идентификации.

**2. Постановка проблемы**

При наличии достаточного количества признаков задача идентификации решается методом полного перебора всех признаков и их сочетаний. Однако этот механизм практически не реализуем из-за большой вычислительной сложности, связанной с размерностью реальных объектов.

Алгоритм поиска идентификационных признаков обычно предполагает рекурсивную процедуру, условием остановки которой является наличие признака или совокупности признаков, позволяющих решить поставленную задачу идентификации. Однако возможно, что такие признаки могут быть и не найдены при заданном наборе признаков. Например, при наличии одинаковых значений признаков на ограниченном наборе признаков рекурсия не будет остановлена.

Актуальность данного исследования состоит в разработке механизма определения отличительных идентификационных признаков объектов.

Целью данного исследования является разработка алгоритма автоматического обучения идентификации образов, основанного на вычислении оценок,

характеризующих отличительные признаки исследуемых объектов или объекта. Достижение поставленной цели предполагает решение следующих основных подзадач:

- 1) формирование набора параметров, характеризующих множество исследуемых объектов, и предварительная обработка этих исходных данных;
- 2) задание числа предполагаемых классов и грубое разбиение исходного множества объектов на заданное число классов;
- 3) разработка механизма, позволяющего оценить отличительные характеристики многомерных объектов;
- 4) построение решающих правил на основе полученных оценок отличительных характеристик признаков объекта.

Подзадачи 1)–2) представляют собой первый этап алгоритма автоматического обучения. Данные подзадачи в той или иной мере решались разными авторами [2].

Подзадачи 3)–4) являются завершающими в решении задачи идентификации. Их решение предусматривает определение и анализ отличительных признаков идентифицируемых объектов и характерных параметров (признаков) объектов каждого грубо сформированного класса, а также построение решающих правил.

**3. Исходные данные**

Любой объект или образ, подлежащий классификации или идентификации, может быть описан с помощью бесконечного количества каких-либо характеристик, и только некоторые из них могут быть использованы в качестве признаков для решения конкретной задачи распознавания, поставленной перед исследователем.

Решение задачи выбора признаков является необходимым в процессе синтеза любой системы распознавания. Однако универсального формализованного подхода для формирования набора признаков не существует. Конечное множество признаков зависит от предметной области и предполагает анализ значительного количества параметров исследуемых объектов, т. е. многоразовое экспериментирование с учетом знаний экспертов данной области.

Оптимальность набора признаков обосновать практически невозможно, можно говорить только об удовлетворяющем качестве сформированного набора признаков. Как правило, формирование набора признаков осуществляется в связи с задаваемым качеством обработки: эффективность выбранных признаков непосредственно связана с качеством распознающей системы. Обычно эта связь выражается

в терминах вероятности правильного распознавания (классификации или идентификации) [3].

Тем не менее, очевидно, что количество выбранных признаков, необходимое для успешного решения задачи распознавания, зависит от информативности этих признаков. Поэтому в процессе их выделения исследователи сталкиваются с проблемными ситуациями, решение которых заключается в поиске компромисса между качеством системы распознавания и набором признаков.

Например, результаты измерения признаков могут содержать дублированную информацию (т. е. имеет место корреляция признаков), что приводит к усложнению схемы соответствующей классификации или идентификации. При возникновении такой ситуации определяется информативность признаков и выбираются более существенные из них, чтобы создать более эффективную и точную систему. Эту процедуру часто называют предварительной обработкой с целью выделения признаков. С другой стороны, часто наиболее информативные признаки не всегда легко измерить или же возможности измерения ограничиваются экономическими факторами, что в свою очередь усложняет задачу выбора признаков и влияет на качество системы распознавания. Это приводит к ситуации, когда, в частности, приходится использовать менее информативные признаки, получение которых обходится дешевле.

Следует отметить, что при решении задачи выделения (измерения) признаков исследователи также сталкиваются с проблемой определения значений качественных признаков. Как правило, значения качественных признаков подвергаются преобразованию с целью их дальнейшего описания в более строгих шкалах измерений (двоичная шкала, шкала отношений и пр.).

При формировании набора признаков исследователи нередко обращаются к математическим признакам, например, статистическим средним, коэффициентам корреляции, характеристическим числам, собственным векторам ковариационных матриц и пр. Это позволяет получить дополнительную информацию, которую можно использовать при решении задачи распознавания в качестве новых признаков.

Таким образом, формирование набора признаков, который учитывает трудности, связанные с реализацией процессов выделения или выбора признаков, и в то же время обеспечивает необходимое качество классификации или идентификации, представляет собой одну из наиболее трудных задач при построении систем распознавания.

Однако большинство компьютерных экспертных систем интеллектуальной поддержки принятия решений, применяемых сегодня на практике, основаны на использовании формализованных программистами знаний специалистов какой-либо прикладной области без привлечения математиков, занимаю-

щихся проблемой обработки многомерных сигналов. Такие экспертные системы лишь отражают субъективное мнение их создателей и не выявляют необходимые для анализа взаимосвязи признаков объектов. Например, экспертная система диагностики ишемической болезни сердца [4]. В данной системе набор признаков классификации и число классов заданы в соответствии со сложившейся клинической практикой. Эти данные определяются один раз и не подвергаются сомнению.

При формировании исходных данных для нашего алгоритма предполагаем, что данные представляются в виде матрицы «объект-свойство», где каждая строка матрицы соответствует значениям выбранных параметров, полученных в результате измерения и характеризующих данный объект.

С целью упрощения анализа этих данных исходную матрицу преобразуем в матрицу нового вида — стандартизированную матрицу [2].

Введем следующие обозначения. Пусть исследователем выбраны для анализа  $m$  объектов  $A$ , описываемые  $n$  параметрами.

Если исходную матрицу записать в виде  $Z = \{z_{ij}\}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{1, n}$ , то переход к стандартизированной матрице  $X = \{x_{ij}\}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{1, n}$ , может быть осуществлен по следующим формулам:

$$z_{ij}^{-1} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m z_{ij}, \quad j = \overline{1, n}, \quad \vdots \quad (1)$$

$$\sigma_j^{-2} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (z_{ij} - z_{ij}^{-1})^2, \quad j = \overline{1, n}, \quad \vdots \quad (2)$$

$$x_{ij} = \frac{z_{ij} - z_{ij}^{-1}}{\sigma_j}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}, \quad i \quad (3)$$

где  $z_{ij}$  — значение  $j$ -го параметра для  $i$ -го объекта исходной матрицы;  $x_{ij}$  — значение  $j$ -го параметра для  $i$ -го объекта стандартизированной матрицы.

Преобразования (1)–(3) можно рассматривать как приведение всех параметров к некоторой стандартной единой шкале. Это позволяет:

1) проводить сравнение параметров, имеющих различный физический смысл;

2) получить матрицу выборочных коэффициентов корреляции;

3) саму матрицу  $X = \{x_{ij}\}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{1, n}$ , рассматривать как  $n$ -мерное пространство, оси которого соответствуют отдельным измерениям объектов. Кроме этого, в результате данного преобразования мы получаем дополнительные признаки — статистические средние и выборочные дисперсии каждого признака.

#### 4. Классификация многомерных объектов

Следует также отметить, что исследователь в процессе анализа исходного набора данных имеет дело не с самим объектом, а с его отображением — математическим объектом, который формируется путем

выбора и использования процедур измерения, отобранных исследователем некоторых характеристик анализируемого объекта. Произвольный выбор исследователем измерительных процедур характеристик объекта приводит к порождению различных математических объектов и отражается на результатах классификации. Это может привести к изменению числа классов объектов, которые согласно шкале наименований идентифицируются однозначно. Кроме того, различные методы классификации могут дать отличающиеся результаты [5].

В данном алгоритме число предполагаемых классов ( $k$ ) анализируемых объектов задается на основании анализа некоторого числа выбранных параметров. В нашем случае — двух столбцов матрицы «объект-свойство», с минимальной и максимальной энтропией (количество измерений рассматривается как конечное множество событий). Анализируя каждый из этих параметров (признаков классификации) отдельно, можно автоматически определить возможное число разбиения объектов на классы при использовании соответственно только этих признаков.

Следует отметить, что описанный выше подход к заданию числа предполагаемых классов не единственный. В общем случае эту подзадачу можно сформулировать следующим образом: нужно определить число параметров из заданного множества (набора), которое необходимо проанализировать, чтобы решить вопрос о количестве классов последующих объектов. Результат решения данной подзадачи зависит от рассматриваемой предметной области, тенденций поведения значений параметров, знаний специалистов данной предметной области и пр.

Таким образом, число классов анализируемых объектов зависит от числа признаков, используемых при классификации, шкал измерения этих признаков и в значительной степени носит субъективный характер. Именно поэтому при решении задач классификации одним из главных является вопрос о числе предполагаемых классов анализируемых объектов.

Число предполагаемых классов определяется при грубом разбиении распознаваемых объектов на  $k$  классов. Использование алгоритма грубого разбиения существенно влияет на результаты классификации, но в рамках данной работы мы его не рассматриваем.

### 5. Методика определения значений функций принадлежности

Механизм оценивания отличительных характеристик многомерных объектов в нашем алгоритме идентификация основывается на вычислении и анализе значений функций принадлежности исследуемых объектов к классам, полученным в результате грубой классификации по каждому признаку из исходного набора. Наличие пересекающихся областей, полученных в результате решения задачи грубой классификации, позволяет утверждать о размытости классов, поскольку в данном случае для некоторого

объекта  $x$ , находящегося в области пересечения некоторых классов  $K_i$  или  $K_j$ , стоит вопрос в том, до какой степени  $x$  принадлежит классу  $K_i$  и  $K_j$ .

В соответствии с изложенным ранее и с учетом фактора размытости классов обозначим через  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_n\}$  и  $X_j = \{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\}^T$ ,  $j = \overline{1, n}$ , пространство и подпространство параметров соответственно. Подпространство параметров  $X_j$ ,  $j = \overline{1, n}$ , в свою очередь может быть разбито на  $k$  размытых множеств  $\{A_{j1}, A_{j2}, \dots, A_{js}, \dots, A_{jk}\}$ ,  $j = \overline{1, n}$ , где  $k$  — число предполагаемых классов. Размытое множество  $A_{js}$ ,  $s = \overline{1, k}$ , в  $X_j$  есть совокупность упорядоченных пар  $A_{js} = \{x_{ij}, \mu_{A_{js}}(x_{ij})\}$ ,  $s = \overline{1, k}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{1, n}$ , а  $\mu_{A_{js}}(x_{ij})$  — функция принадлежности объекта  $x_{ij}$  к  $A_{js}$  по параметру  $j$ , характеризующая соответственно степень принадлежности  $A_{js}$  к  $X_j$ .

Методика определения функции принадлежности значения исследуемого  $j$ -го признака к  $s$ -му классу основана на определении уровней подмножеств заданного нечеткого множества и анализе частоты встречаемости значений  $j$ -го признака, относящегося к  $s$ -му классу [6].

Пусть  $A_{js}$  — нечеткое множество конечного множества  $X_j = \{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\}^T$ , где  $x_{ij}$ ,  $i = \overline{1, m}$  — дискретное значение исследуемого признака  $j$ . Тогда нечеткому подмножеству  $\alpha$ -уровня нечеткого множества  $A_{js}$  можно поставить в соответствие четкое подмножество  $A_{js}^\alpha$  множества  $X_j$ , содержащее все элементы, степень принадлежности  $\mu_{A_{js}}(x_{ij})$  которых не менее  $\alpha$ . То есть

$$A_{js}^\alpha = \{x_{ij} \mid \mu_{A_{js}}(x_{ij}) \geq \alpha, x_{ij} \in X_j\}, \alpha \in [0, 1], i = \overline{1, m}.$$

Таким образом, нечеткое множество  $A_{js}$ , несмотря на нечеткость его границ, может быть точно определено путем сопоставления каждому значению числа  $x_{ij}$ , лежащего между нулем и единицей, которое представляет собой степень его принадлежности к  $A_{js}$ .

Методика определения степени принадлежности значений признака состоит в следующем:

1) Строится гистограмма, где по оси ординат откладываются количества встречаемости  $j$ -го признака  $s$ -го класса, полученного при грубом разбиении. По оси абсцисс откладываются дискретные значения этого признака.

2) Диапазон изменения количества встречаемости значений  $j$ -го признака, измеряемый от 0 до некоторого максимального значения, ассоциируется с единичным интервалом изменения степени принадлежности. Этот диапазон разбивается на  $M$  частей равной длины. Число  $M$  задается априорно, например,  $M$  равно удвоенному числу классов, полученных при грубом разбиении.

3) В зависимости от принадлежности значений признака соответствующим поддиапазнам, полученным на предыдущем шаге, производится их

группирование. Вычисляются суммарные количества встречаемости значений признака  $N_0, N_1, \dots, N_{M-1}$  для каждого поддиапазона.

4) Вычисляются степени принадлежности значений  $j$ -го признака, являющиеся элементами четкого подмножества  $A_{js}^{\alpha_0}$  ( $1 \geq \alpha_0 > 1 - \frac{1}{M}$ ), т. е. тех элементов, значения встречаемости которых соответствуют поддиапазону от максимального значения (1) до  $\frac{1}{M}$ .

Формула расчета принадлежности некоторого значения  $x_j$  нечеткому множеству  $A_{js}$  получается из пропорции, составленной на том основании, что неизвестной степени принадлежности соответствует известная частота, вычисляемая как отношение количества встречаемости  $q$ -го значения  $j$ -го признака  $\alpha_0$ -го уровня  $N_0(x_q)$  к общему количеству встречаемости значений признака  $\alpha_0$ -го уровня ( $N_0$ ). А частоте встречаемости значений признака  $\alpha_0$ -го уровня четкого подмножества, при условии равенства количества встречаемости каждого значения признака, соответствует степень принадлежности, равная  $\text{vir } \alpha_0 = 1$ . Тогда значение степени принадлежности  $q$ -го значения  $j$ -го признака классу  $s$  равно

$$\mu_{A_{js}}(x_q) = \frac{N_0(x_q)N}{N_0 N_{\text{общ}}}$$

где  $N = \sum_{m=0}^{M-1} N_m$  — суммарное количество встречаемости значений признака, степень принадлежности которых еще не определена;  $N_{\text{общ}}$  — общее количество значений встречаемости исследуемого признака.

Отметим, что для  $\alpha_0$ -го уровня  $N = N_{\text{общ}}$ .

5) Вычисляются степени принадлежности значений признака, являющихся элементами четкого подмножества  $A_{js}^{\alpha_1}$ , где ( $1 - \frac{1}{M} \geq \alpha_1 > 1 - \frac{2}{M}$ ). Формулы

расчета степеней принадлежности аналогичны предыдущему шагу, за исключением того, что при их получении не учитываются элементы, степень принадлежности которых уже определена ранее.

Таким образом, рекуррентная формула вычисления степеней принадлежности  $q$ -го значения  $j$ -го признака классу  $s$  может быть представлена в следующем виде:

$$\mu_{A_{js}}(x_q) = \frac{N_k(x_q)(N - \sum_{k=0}^K N_k)M}{N_k N_{\text{общ}}(M - K)}$$

где  $N_k(x_q)$  — количество встречаемости  $q$ -го значения  $j$ -го признака, соответствующего  $K$ -му уровню,

$K = 0, 1, \dots, M - 1$ ;  $N = \sum_{m=0}^{M-1} N_m$  — суммарное количество

встречаемости неучтенных значений признака, соответствующих вычислительной процедуре данного

уровня;  $\sum_{k=0}^K N_k$  — количество встречаемости значе-

ний признака, учтенных на момент анализа  $K$ -го уровня;  $M$  — число, определяющее единицу изменения (шкалу) анализируемых значений исследуемого  $j$ -го признака ( $M > K$ );  $N_k$  — суммарное количество встречаемости значений признака  $k$ -го уровня;  $N_{\text{общ}}$  — суммарное количество значений  $j$ -го признака, соответствующих анализируемому размытому множеству.

### 6. Заключение

Научная новизна данного исследования заключается в разработке алгоритма обучения идентификации, который основан на вычислении оценок отличительных характеристик многомерных объектов. Механизм оценивания заключается в определении значений функций принадлежности исследуемых объектов к классам, полученным в результате грубой классификации, по каждому признаку из исходного набора. Данный подход позволяет «уйти» от полного перебора всех признаков и их сочетаний, что приводит к упрощению вычислительной схемы алгоритма идентификации.

Практическая значимость данного исследования — возможность создания интеллектуальных систем распознавания, которые могут быть использованы в различных прикладных областях, характеризующихся большой размерностью исследуемых объектов.

Список литературы: 1. Загоруйко Н. Г. Методы распознавания и их применение. — М.: Советское радио, 1972. 2. Браверман Э. М., Мучник И. Б. Структурные методы обработки эмпирических данных. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 3. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов / Пер. с англ. Н. Б. Гуревича под ред. Ю. П. Журавлева. — М.: Мир, 1978. 4. Рощейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. — Вильнюс: УИЦВЕРСУМ-Вильнюс, 1999. 5. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение / Пер. с англ. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. — 752 с. 6. Бритик В. И. Локально-адаптивные фильтры в задачах обучения распознаванию образов // Автоматизированные системы управления и приборы автоматки. — Харьков, 1988.

Поступила в редакцию 04.10.2006

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНОЙ БАЗЫ ДАННЫХ

### 1. Введение

Концептуальная схема является центральным звеном в архитектуре систем баз данных (БД), обеспечивающим интерпретацию внешнего представления данных в их внутреннее представление в информационных системах. В проблематике моделей данных в систем БД основное место занимают вопросы проектирования и поддержки концептуальной схемы [1, 2]. В настоящей работе рассматривается класс реляционных БД, получивших название несогласованных БД. Подразумевается, что БД состоит из множества отношений, естественное соединение которых необязательно сохраняет эти отношения, то есть проекция естественного соединения на множество атрибутов отношения необязательно равна этому отношению. Одновременно предполагается, что «несогласованность» отношений не является произвольной, а определяется условиями семантической целостности данных, хранимых в БД.

Ключевая роль в поддержке семантической целостности отводится ограничениям целостности специального вида — функциональным зависимостям между атрибутами отношения БД ( $F$ -зависимости). Понятие функциональной зависимости хорошо известно и детально описано в литературе, например в [2, 3]. Однако свойства этих зависимостей и их влияние на процессы ведения крупномасштабной БД (и, соответственно, на вид схемы БД) изучены недостаточно. Под крупномасштабной БД будем понимать систему с распределенной организацией обработки данных при наличии семантической независимости локальных БД.

Одной из важных задач поддержки целостности крупномасштабной БД является способность глобально поддерживать заданные локальные  $F$ -зависимости. Сложность поддержки ограниченной состоит в том, что проверка  $F$ -зависимостей внутри локальных отношений суммарно не всегда обеспечивает выполнение ограничений «в масштабе» всего универсального отношения (отношение, полученное путем соединения всех локальных отношений).

Таким образом, целью работы является определение основных свойств операций естественного соединения и проекции при допущении несогласованности значений в отношениях БД, а также определение методики поддержки функциональных зависимостей при интеграции БД на этапе построения крупномасштабной системы.

### 2. Прикладные средства ведения крупномасштабной базы данных

Запросы, которые в общем случае представляют собой произвольные функции над отношениями, часто используют развитые языки высокого уровня.

Наиболее распространенными языками для реляционных систем управления базами данных являются алгебраические языки, позволяющие выражать запросы средствами специализированных операторов, применяемых к отношениям. Такие языки должны обеспечивать не только абстрактные функции, но и дополнительные потребности пользователей.

Рассмотренные в [4] модифицированные операции реляционной алгебры позволяют решить ряд нестандартных задач при ведении крупномасштабной БД. Для расширения возможностей проверки выполнимости  $F$ -зависимостей введем дополнительные операции над несогласованными отношениями БД.

Пусть  $U$  — непустое множество атрибутов. Реляционную алгебру над  $U$  будем обозначать  $\mathcal{R}^{RDB} = \langle U, \Omega \rangle$ , где  $\Omega$  — множество операций реляционной алгебры. При допущении неопределенностей в отношениях, операции алгебры  $\mathcal{R}^{RDB}$  теряют ряд важных свойств, в частности ассоциативность соединения. Расширенную алгебру, дополненную модифицированными операциями проекции и соединения, позволяющими выполнять операции с неопределенностями, будем обозначать  $\mathcal{R}^{ADB} = \langle U, \Omega' \rangle$ , где  $\Omega'$  — расширенное множество операций реляционной алгебры. Дополнение представляет собой две операции: операцию соединения, в обозначении  $\succ^U$ , при которой каждая строка попадает в соединение, и операцию проекции в обозначении  $\pi_x^U$ , исключающую строки с неопределенными значениями. Множество полных отношений (недопускающих неопределенные значения) обозначим  $Rel$ , а множество частичных отношений (допускающих неопределенности) —  $Rel \uparrow$ .

Для обобщенных операций проекции и естественного соединения можно выделить область определения из отношений, входящих в множество  $Rel \uparrow$ . Результат применения этих операций, то есть область значений, при этом также остается в множестве  $Rel \uparrow$ . С другой стороны, областью определения обобщенных операций также является множество  $Rel$ , но область значений этих операций может принадлежать множеству  $Rel \uparrow$ . В случае, когда для каждого кортежа каждого отношения найдется хотя бы один соединимый кортеж, область значений алгебры  $\mathcal{R}^{ADB}$  не выходит из множества  $Rel$ .

Рассмотрим базу  $d$  со схемой  $R = \{AB, BD, AC, CD\}$ , представленную на рис. 1, и множество функциональных зависимостей  $F = \{A \rightarrow B, B \rightarrow D, A \rightarrow C, C \rightarrow D\}$ .

A	B	B	D	A	C	C	D
a	b	b	d	a	c	c	d
a <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>1</sub>	d	a <sub>1</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>1</sub>	d

Рис. 1. Пример полностью соединимых отношений

Предположим, необходимо получать универсальное отношение, то есть отношение, включающее все атрибуты рассматриваемой БД, для проверки некоторой  $F$ -зависимости из множества  $F$ . Применим к БД обобщенные операции из алгебры  $\mathfrak{R}^{ADB}$  (рис. 2).

A	B	C	D
a	b	c	d
a1	b1	c1	d

Рис. 2. Результат соединения отношений операцией  $><^U$

Как видно из приведенного примера, результатом операции  $><^U$  является отношение из  $Rel$ , то есть

в данном случае эта операция аналогична операции  $><$  алгебры  $\mathfrak{R}^{RDB}$ .

Напомним, что рассматривается класс крупномасштабных БД, где допустимы несогласованные отношения. Предположим, что отношения, изображенные на рис. 1, дополнены кортежами  $\langle a, b_2 \rangle$  и  $\langle a, c_2 \rangle$  (рис. 3).

A	B
a	b
a1	b1
a	b2

B	D
b	d
b1	d

A	C
a	c
a1	c1
a	c2

C	D
c	d
c1	d

Рис. 3. Несогласованные отношения

Результат соединения таких отношений операцией  $><^U$  изображен на рис. 4, откуда видно, что универсальное отношение является отношением, входящим в множество  $Rel \uparrow$ .

A	B	C	D
a	b	c	d
a1	b1	c1	d
a	b2	⊥	⊥
a	⊥	c2	⊥

Рис. 4. Результат соединения несогласованных отношений (частичное отношение)

При необходимости возврата к исходным отношениям можно воспользоваться модифицированной операцией  $\pi_{\chi}^U$ , в результате применения которой получим отношения, аналогичные рис. 3.

Таким образом, в алгебре  $\mathfrak{R}^{ADB}$  область значений расширяется до множества

$Rel \cup Rel \uparrow$ . Такое допущение позволяет осуществлять глобальную поддержку  $F$ -зависимостей традиционным методом, то есть через универсальное отношение.

Определим отображение  $\phi$  как пару вида  $\langle \{R_i\}, \mathbf{R} \rangle$ , тогда области определения алгебр  $\mathfrak{R}^{ADB}$  и  $\mathfrak{R}^{NDB}$  можно записать формально. Для алгебры  $\mathfrak{R}^{ADB}$  функциями  $\phi$  и  $\phi^{-1}$  будут иметь вид:

$$\phi_{ADB}: \{R_i\} \rightarrow \mathbf{R} \in Rel.$$

$$\phi_{ADB}^{-1}: \{\mathbf{R}\} \rightarrow R_i \in Rel.$$

Для алгебры  $\mathfrak{R}^{NDB}$  отображение  $\phi$  примет вид:

$$\phi_{NDB}: \{R_i\} \rightarrow \mathbf{R} \in Rel \cup Rel \uparrow.$$

$$\phi_{NDB}^{-1}: \{\mathbf{R}\} \rightarrow R_i \in Rel.$$

Базовая реляционная алгебра является основным инструментом управления реляционными данными и проектирования структур БД. Простота и лаконичность этой алгебры описана в работе [5]. Развитие распределенных систем привело к соответствующим исследованиям в данной области. Одним из результатов таких исследований является предложенная расширенная алгебра  $\mathfrak{R}^{NDB}$ .

Ц, хотя рассмотренная алгебра является инструментом для решения ограниченного класса задач, она играет роль связующего звена теоретических исследований с практическими вопросами глобальной поддержки целостности крупномасштабных БД.

### 3. Поддержка функциональных зависимостей крупномасштабной базы данных

Положения предыдущего раздела дали основания для исследования вопроса поддержки целостности крупномасштабной БД, основанного на проверке выполнимости локальных  $F$ -зависимостей на универсальном отношении. Содержательно этот процесс можно разбить на четыре этапа.

При интеграции информационных систем поддержка  $F$ -зависимостей, определенных в локальных отношениях, не гарантирует семантической однозначности данных в ключевых атрибутах. Одна из способов однозначной идентификации ключа можно проверить при соединении всех отношений, то есть построением универсального отношения. При этом сократить количество соединяемых отношений можно с использованием модифицированного ограничения на внешний ключ (МОВК) [4], смысл которого сводится к тому, что БД удовлетворяет МОВК относительно  $F$ , если  $\forall R_i \in \mathbf{R}$  и  $t \in r(R_i) \exists t' \in R_i^+$ , таких что  $\forall R_j \subseteq R_i^+ \exists t'(R) \in r(R_j)$ , и, в частности,  $t'(R_i) = t$ . Напомним, что  $R_i^+$  означает замыкание  $R_i$  относительно  $F$ .  $r(R_i)$  — экземпляр отношения  $R_i$ , а  $t$  — строку отношения.

Таким образом, первый этап алгоритма поддержки  $F$ -зависимости заключается в определении множества отношений, отвечающих МОВК для каждого ключа во всех локальных отношениях. Как отмечалось выше, такие множества могут содержать как одно отношение (непосредственно содержащее рассматриваемую  $F$ -зависимость), так и все отношения БД. Множество схем соединяемых отношений в дальнейшем будем называть *планом соединения*, или *планом*. Схему отношения при соединении по плану соединения будем называть *схемой плана соединения*, или *схемой плана*, и обозначим  $plan(\{R_i\})$ . При этом возможны три следующие ситуации. Пусть БД имеет схему  $\mathbf{R} = \{R_1, \dots, R_n\}$ , тогда

1.  $plan(\{R_n\}) = \{R_1, R_2, \dots, R_1, \dots, R_n\}$ ;
2.  $plan(\{R_p\}) = \{R_j, R_{j+1}, \dots, R_p\}$ ;
3.  $plan(\{R_k\}) = \{R_k\}$ .

Таким образом, при обновлении определенных отношений для некоторых планов соединения возможно значительное сокращение временных затрат путем исключения «дорогостоящей» операции естественного соединения.

В тех случаях, когда все же полное соединение неизбежно, необходимо перейти ко второму этапу алгоритма, то есть воспользоваться редуktивным алгоритмом Грэхема, описанным в [4], и определить, к какому классу схем относится схема плана. Принадлежность схемы плана к классу ациклических схем дает возможность осуществлять поддержку  $F$ -зависимостей попарным соединением отношений плана.

Сложность связей между локальными отношениями распределенных информационных систем практически исключает успешное завершение редуktивного алгоритма, то есть схема плана соединения в основном относится к классу циклических схем.

На следующем этапе алгоритма необходимо преобразовать циклическую схему к ациклическому виду, точнее, к блочно-ациклическому, то есть необходимо некоторое эквивалентное преобразование схемы плана. Пусть для  $R_i$  схема плана имеет вид  $plan(\{R_p\}) = \{R_1, R_2, \dots, R_{i-1}, \dots, R_p\}$  и пусть циклический блок состоит из множества  $R'_i = \{R_{i-1}, R_i, R_{i+1}\}$ . Тогда в результате перехода к ациклической схеме схема плана примет вид:  $plan'(\{R_p\}) = \{R_1, R_2, \dots, R'_i, \dots, R_p\}$ , где отношение со схемой  $R'_i$  является результатом естественного соединения отношений циклического блока.

Как отмечалось в [4], преобразование схемы связано с увеличением временных затрат при попарном соединении. С другой стороны, блочно-ациклическое представление схемы исключает полное соединение отношений, что снижает время проверки глобальной выполнимости  $F$ -зависимостей, а также исключает сложность работы с неопределенными значениями.

Все перечисленные шаги алгоритма выполняются на этапе интеграции баз данных. Выделение плана соединения, определение его вида, а также построение блочно-ациклической схемы выполняются один раз, на начальном этапе разработки информационной системы.

Следующий шаг связан непосредственно с поддержкой  $F$ -зависимостей, которая осуществляется на этапе ведения данных. Поддержка  $F$ -зависимостей ведется по ключу, то есть проверяется однозначность значений ключевого атрибута. Распределенное ведение крупномасштабной БД требует, как отмечалось ранее, проверки уникальности ключа во всех локальных отношениях, где существует ключевой атрибут, а именно проверки однозначности ключа в схеме плана соединения. При необходимости

предварительная модификация схемы плана обеспечивает выполнение условия, когда попарное соединение эквивалентно соединению в целом, что снижает время проверки однозначности ключа.

Общую схему алгоритма можно представить в виде двух основных этапов. Первый выполняется на стадии проектирования БД и состоит, в свою очередь, из нескольких шагов, описанных выше. Второй этап, непосредственно поддержка  $F$ -зависимостей, выполняется при ведении БД и основан на результатах, полученных на предыдущих шагах алгоритма. Содержательная схема алгоритма представлена на рис. 5.

При поддержке целостности БД используется традиционный подход, основанный на  $F$ -зависимостях, но предлагаемые средства для решения этой задачи значительно расширяют методы ведения крупномасштабных БД. При этом одним из важных результатов является допущение несогласованности данных в локальных отношениях, за исключением значений в ключевых атрибутах. Это необходимо для сохранения связи между отношениями, а также для сохранения крупномасштабной БД как единого семантического целого.

Обобщенная последовательность шагов проектирования крупномасштабной БД представлена на рис. 6.

Предлагаемая последовательность позволяет определить структуру БД, а также представить локальные БД и разместить их по узлам сети (или интегрировать существующие локальные представления

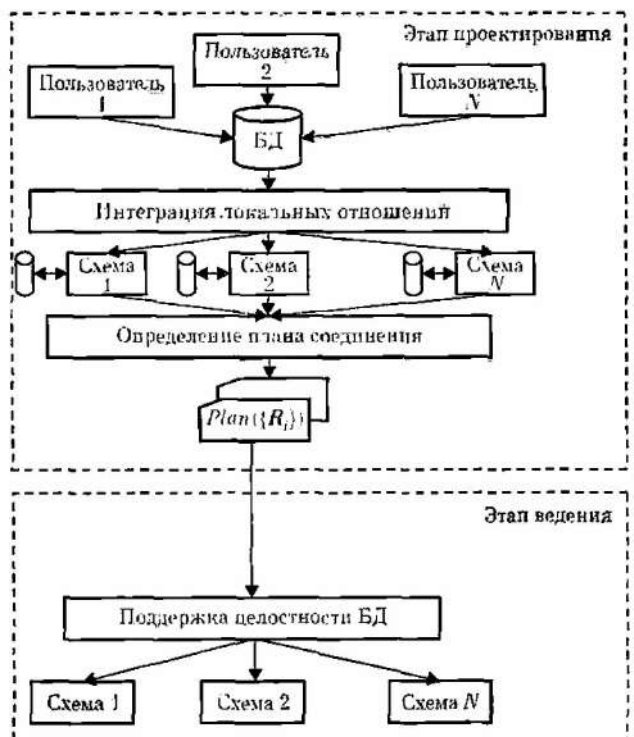


Рис. 5. Схема поддержки крупномасштабной БД

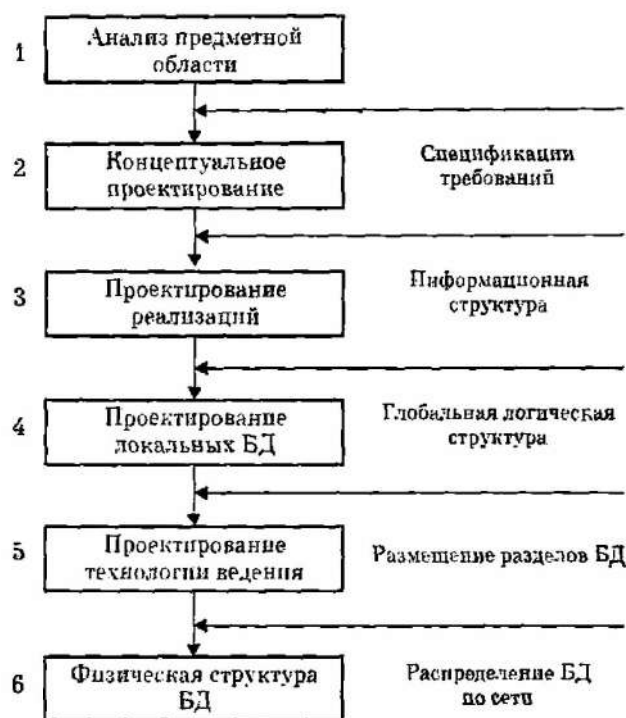


Рис. 6. Этапы построения крупномасштабной БД

в единую глобальную логическую структуру). Кроме того, проектируется технология ведения, обеспечивающая эффективную поддержку локальных БД.

Системы управления с такими возможностями обычно используют одинаковые модели данных, описывающие каждую локальную БД, входящую в систему, и поддерживают справочник о размещении БД. С учетом этого факта, после выполнения проектировщиком этапов 1–4, приложения получают возможность использовать преимущества однородности и согласованности БД, что эквивалентно использованию общесистемного стандарта, принятого в организации централизованных систем. Этап 6 может быть выполнен в каждом узле системы автономно с тем, чтобы учесть особенности локальных БД. Отметим, что выполнение этапов 1, 2, 3 и 6 целесообразно выполнению этапов при проектировании

централизованных БД, поэтому в дальнейшем необходимо обратить внимание на модификацию и дополнения этапов проектирования локальных структур и глобальной логической схемы БД.

#### 4. Заключение

В настоящей статье рассмотрено возможное расширение методологии проектирования БД на крупномасштабные архитектуры. При этом в крупномасштабных системах логически целостная БД может быть фрагментирована и распределена по узлам сети. Как отмечалось в работе, фрагментация и распределенное ведение БД без внимательного централизованного планирования часто приводят к беспорядку и несогласованности данных. Предлагаемая процедура поэтапного проектирования крупномасштабной БД учитывает это важное обстоятельство.

Практическая значимость предложенных результатов состоит в расширении возможностей использования традиционных методов поддержки целостности при интеграции локальных БД в единую крупномасштабную систему. Дальнейшие исследования в этой области следует направить на изучение свойств запросов, влияющих на изменение данных, и построение модели транзакции для обеспечения согласованного взаимного доступа между локальными данными.

Список литературы: 1. *Бойко В. В., Савинков В. М.* Проектирование информационной базы автоматизированной системы на основе СДБД. — М.: Финансы и статистика, 1982. — 174 с. 2. *Богодист В. П., Буслык Н. Н., Дедиков Э. А., Жидан А. Н.* Методы проектирования схемы реляционной базы данных // Техника средств связи: Сер. ТЭУ. — М., 1985. — Вып. 2. — С. 49–51. 3. *Гарсия-Молана Г., Ульман Дж., Уидом Дж.* Системы баз данных. Полный курс: Пер. с англ. — М.: ИД «Вильямс», 2003. — 1088 с. 4. *Мейер Д.* Теория реляционных баз данных. — М.: Мир, 1987. — 608 с. 5. *Дейт К.* Введение в системы баз данных: Пер. с англ. — М.: ИД «Вильямс», 2001. — 1072 с.

Поступила в редакцию 14.09.2006

УДК 621.396.961.1

Б. В. Шамша, Т. Б. Шатовська, В. М. Халецький

## ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ЯКОСТІ УСПІШНОСТІ СТУДЕНТІВ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ

### 1. Постановка проблеми аналізу якості успішності студентів у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями

Найбільш розробленою в педагогічній науці на цей час є проблема добору змісту освіти, а найменш вивченою — керування педагогічною системою, особливо керування якістю навчання, яке можна здійснювати при аналізі поточних результатів успішності та, на його підставі, прогнозуванні успішності на майбутнє. У навчальних закладах з'являється необхідність у постійному моніторингу освіти кожної навчальної групи і кожного студента з метою внесення необхідних коректив. Як адміністрація, так і викладачі зацікавлені в адекватній оцінці навчальних досягнень студентів, навчальної діяльності викладачів, вузу в цілому.

Предмет дослідження цієї роботи — аналіз і прогнозування якості навчання як засіб підвищення рівня знань студентів й ефективності керування освітою.

Об'єкт дослідження — результати навчально-виховного процесу й засоби, використовувані для їхнього досягнення.

Мета дослідження — розробити концепцію АІС моніторингу, аналізу і прогнозування якості навчання для забезпечення оперативної корекції процесу засвоєння навчального матеріалу, підвищення якості навчально-виховного процесу. Для кожного студента може бути розроблений прогноз його навчальних досягнень, а також прогноз щодо закінчення ним вузу.

Задачі моніторингу:

- відібрати об'єктивні методи прогнозування й критерії оцінки результатів;
- розробити документацію для методичного супроводу проведення прогнозування;
- випробувати в дії механізм інформування всіх учасників освітньої системи;
- одержати об'єктивні дані, що свідчать про визначений рівень якості освіти;
- дослідити ряд порівняльних показників по групах і університету в цілому;
- дослідити причини неуспішності студентів на різних етапах навчання;
- дослідити професійну готовність викладачів університету до застосування нових педагогічних технологій;
- намітити стратегію освітнього процесу.

### 1.2. Моніторинг і прогнозування як засіб керування якістю освіти

Нові освітні умови системи керування характеризуються децентралізацією, розпадом ієрархічної управлінської системи. В умовах ринку кожен навчальний заклад змушений звернутися до пошуку «свого обличчя» і відповідної структури керування, що перестала бути універсальною. Традиційні компоненти керування — планування, організація, керівництво і контроль — доповнюються новим функціональним складом — аналіз і прогнозування, що забезпечує організованість спільної діяльності студентів і викладачів і спрямований на досягнення освітніх цілей розвитку університету.

Керівництво, таким чином, повинне вчасно реагувати на зміни в керованих об'єктах, повинне мати про них інформацію. Має діяти зворотний зв'язок, реалізований у формі контролю. Більш того, керування має адаптатися до змін освітньої ситуації, до її нових вимог. Моніторинг і аналіз обумовлені необхідністю постійного відстеження стану навчально-виховного процесу, окремих його ланок з метою діагностики, аналізу, корекції, прогнозування управлінських дій для досягнення планового результату.

Організація внутрішньоуніверситетського освітнього моніторингу, тобто системи організації збору, зберігання, обробки й розповсюдження інформації про діяльність педагогічної системи, здійснюється із застосуванням нових інформаційних технологій у рамках ІАС «Університет».

В українських вузах поставлена проблема на цей час практично не досліджена.

### 2. Байтсівська процедура дискримінаційного аналізу побудови моделі прогнозу якості навчання студентів

#### 2.1. Модель аналізу якості навчання студентів

Як метод розпізнавання образів для розв'язання задачі прогнозування якості успішності студентів вибраний дискримінаційний аналіз.

Діагностика засвоєння та якості знань студентів проводиться протягом навчального року за всіма навчальними дисциплінами, по групах і університету в цілому. Здійснюються обробка й аналіз отриманих результатів. За результатами діагностики складаються таблиці успішності студентів, потім проводиться дискримінаційний аналіз з метою спрогнозувати з певною вірогідністю віднесення студентів до груп за певними критеріями успішності.

2.2. Задача дискримінації в загальному вигляді

Для розв'язання задачі прогнозування якості навчання — чи отримає студент першого курсу червоний диплом по закінченні п'ятого курсу університету за результатами трьох семестрових оцінок першої сесії — використовуємо дискримінантний аналіз та байєсівську процедуру класифікації.

Дискримінантний аналіз (ДА) є розділом багатовимірного статистичного аналізу, який дозволяє вивчати відмінності між двома і більшою кількістю груп об'єктів за декількома змінними одночасно. Дискримінантний аналіз — це загальний термін, що відноситься до декількох тісно пов'язаних між собою статистичних процедур. Ці процедури можна розділити на методи інтерпретації міжгрупових розбіжностей (дискримінації) і методи класифікації спостережень за групами. У загальному випадку задача дискримінації формулюється в такий спосіб.

Маємо набір об'єктів, розбитий на декілька класів  $W_i, i = 1, 2, \dots, k$  (тобто про кожний об'єкт можна сказати, до якого класу він належить). Для кожного об'єкта існують виміри  $X = (x_1, x_2, \dots, x_p)$  декількох кількісних характеристик. Необхідно знайти спосіб, що дозволяє на основі наявних характеристик визначити клас, до якого належить об'єкт. Це дозволить для нових об'єктів, що відносяться до того ж набору, визначити групи, до яких вони належатимуть. Характеристики, застосовані для того, щоб відрізнити один клас від іншого, називаються дискримінантними змінними.

Для розв'язання цієї задачі необхідно побудувати функції вимірюваних характеристик, значення яких пояснюють розбиття об'єктів на групи. Бажано, щоб цих функцій (дискримінуючих ознак) було небагато — у цьому випадку результати аналізу легше змістовно витлумачити.

2.3. Розв'язання задачі класифікації студентів

у випадку двох багатовимірних нормальних популяцій при невідомих параметрах розподілу

Вхідні дані для розв'язання задачі класифікації подано в табл. 1 і табл. 2.

Класифікація студентів проводиться за трьома основними класифікаційними ознаками — результатами семестрових оцінок. Отже,  $p = 3$  — кількість параметрів класів.

Відповідно до умови задачі, студенти розділені на два класи:  $W_1$  — студенти, які закінчили вуз із червоним дипломом;  $W_2$  — студенти, які закінчили вуз зі звичайним дипломом.

Відповідно,  $X$  — вектор оцінок студентів, має три складові:  $X = (x_1, x_2, x_3)$ .

Нехай маємо об'єкт, якому відповідає вектор спостережень  $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)'$ . Потрібно віднести його на основі цих спостережень до популяції  $W_1$  з розподілом  $N(\mu_1^{P+1}, \Sigma^{P \times P})$  чи до  $W_2$  з розподілом  $N(\mu_2^{P+1}, \Sigma^{P \times P})$ , де  $\mu_i = (\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{ip}), i = 1, 2; \mu_1, \mu_2$  — вектори середніх;  $\Sigma$  — матриця коваріацій.

Таблиця 1

Вибірка даних про результати першої сесії студентів, які одержали червоний диплом

№	Вища математика	Інженерна та комп'ютерна графіка	Основи програмування та алгоритмічні мови
1	5	5	5
2	5	5	5
3	5	4	4
4	5	5	5
5	5	5	5
6	5	5	5
7	5	5	5
8	5	5	4
9	4	4	5
10	5	5	5
11	5	4	4
12	5	5	5
13	5	4	5
14	5	5	5
15	5	5	5
16	4	5	5
17	5	4	5
18	5	5	5
19	5	4	4
20	5	5	5
$\mu$ — середнє значення вектора	4.90	4.70	4.80

Таблиця 2

Вибірка даних про результати першої сесії студентів, які одержали звичайний диплом

№	Вища математика	Інженерна та комп'ютерна графіка	Основи програмування та алгоритмічні мови
1	4	5	4
2	4	5	3
3	4	4	4
4	3	3	3
5	4	3	3
6	4	3	3
7	4	5	3
8	5	4	5
9	4	3	3
10	3	3	4
11	5	4	5
12	4	3	4
13	4	4	4
14	4	5	5
15	4	4	5
16	4	3	4
17	3	4	5
18	4	4	4
19	3	5	4
20	3	5	4
21	3	4	4
22	4	4	4

Закінчення табл. 2

№	Вища математика	Інженерна та комп'ютерна графіка	Основи програмування та алгоритмічні мови
23	3	4	3
24	4	3	4
25	4	4	5
26	4	4	4
27	4	4	4
28	4	4	3
29	3	4	3
30	4	5	4
31	4	4	4
32	4	4	5
33	3	3	3
34	4	4	3
35	4	5	4
36	3	4	3
37	4	4	4
38	4	4	4
39	3	3	4
40	4	5	5
41	4	4	4
42	5	4	5
43	3	3	3
$\mu$ — середнє значення вектора	3.79069767	3.95348832	3.906976744

Подібні задачі можуть розв'язуватися в декількох варіантах:

- коли відомі апіорні й апостеріорні ймовірності та вартості помилкової класифікації;
- коли невідомі апіорні й апостеріорні ймовірності та вартості помилкової класифікації;
- коли відомі середні значення векторів вхідних даних;
- коли невідомі середні значення векторів вхідних даних;
- коли закон розподілу — нормальний;
- коли закон розподілу — ненормальний.

У цій роботі передбачається, що вектори середніх  $\mu_1, \mu_2$  і матриця коваріації  $\Sigma$  — невідомі, закон розподілу — нормальний, невідомі апіорні ймовірності та вартості помилкової класифікації. Якщо  $x_{11}, \dots, x_{1n_1}$  та  $x_{21}, \dots, x_{2n_2}$  — незалежні випадкові вибірки з популяцій  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$  відповідно, то можна оцінити  $\mu_i$  вибірковою вектором середніх  $x = (x_{i1}, \dots, x_{ip})', i = 1, 2$ , а  $\Sigma$  — об'єднаною вибірковою коваріаційною матрицею  $S = (S_{jk}), j = 1, \dots, p, k = 1, \dots, p$ .

Апіорні ймовірності  $q_1, q_2, \dots, q_k$  віднесення  $X_i$  до того чи іншого класу можна оцінити величинами

$$q_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2}, q_2 = \frac{n_2}{n_1 + n_2}, \text{ де } n_1 - \text{обсяг вибірки № 1, } n_2 - \text{обсяг вибірки № 2.}$$

У такій ситуації неможливо знайти процедуру класифікації, що була б оптимальною щодо вартості помилкової класифікації. Однак можна показати, що якщо параметри в узагальненій байєсівській процедурі замінити їхніми обґрунтованими оцінками, то в результаті очікувана вартість помилкової класифікації спадатиме за умови  $n_1$  і  $n_2 \rightarrow \infty$ . Оскільки наведені вище оцінки обґрунтовані, узагальнена процедура байєсівської класифікації на основі оцінок параметрів полягає в такому: спочатку зважується система рівнянь із заміною  $\mu_{ij}$  на  $\bar{x}_{ij}$ , де  $i = 1, 2, j = 1, \dots, p$ , і заміною  $\sigma_{jm}$  на  $s_{jm}, m = 1, \dots, p$ . Потім отримані оцінки коефіцієнтів  $\alpha_1, \dots, \alpha_p$  (позначимо їх  $a_1, \dots, a_p$ ) використовуються для визначення дискримінантної функції  $z_{ij}$  для кожного вектора спостережень  $x_{ij}, i = 1, \dots, n$ . Далі  $\xi_i$  оцінюються величинами

$$\bar{z}_i = \frac{1}{n_j} \sum_{l=1}^{n_j} z_{il}$$

а  $\sigma^2$  — величиною

$$\sigma_i^2 = \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^p a_j s_{jm} a_m$$

Таким чином, узагальнена байєсівська процедура оцінювання полягає у віднесенні  $x = (x_1, \dots, x_p)'$  до  $\Pi_1$ , якщо

$$z = \sum_{i=1}^n a_i x_i \geq \frac{\bar{z}_1 + \bar{z}_2}{2} + \ln \frac{q_2 C(1/2)}{q_1 C(2/1)}$$

і до  $\Pi_2$  — у протилежному випадку.

Вибіркова відстань Махаланобіса  $D^2 = (\bar{z}_1 - \bar{z}_2)^2 / s^2$  є оцінкою для  $\Delta_2$ .

У результаті роботи програм дискримінантного аналізу, як правило, одержуємо таке:

а) оцінки коефіцієнтів дискримінантної функції  $a_1, \dots, a_p$ ;

б) значення дискримінантної функції  $z_{ij}$  для кожного вектора спостережень  $x_{ij}, i = 1, 2; j = 1, \dots, p$ ;

в) вибіркві середні  $\bar{z}_1$  і  $\bar{z}_2$ ;

г) вибіркві відстань Махаланобіса  $D^2$ . Ця інформація достатня для запису процедури класифікації.

Математичні сподівання для даних класів оцінок у п'ятибальній системі відповідно дорівнюють:

$$\mu_1 = (4.9; 4.7; 4.8);$$

$$\mu_2 = (3.79; 3.95; 3.91).$$

Коваріаційна і кореляційна матриці, а також перевірка нормальності закону розподілу вхідних даних були проведені з використанням пакету програм «Statistica».

Розрахуємо апіорні ймовірності помилкової класифікації об'єкта:

$$q_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2} = 20 / (20 + 43) = 0.317;$$

$$q_2 = \frac{n_2}{n_1 + n_2} = 0,683.$$

Вартість помилкової класифікації приймемо рівною вартості контракту навчання на одній зі спеціальностей вузу:

$$C(1/2) = 3100 \text{ грн,}$$

$$C(2/1) = 3100 \text{ грн.}$$

Визначимо сталі коефіцієнти  $\alpha_1, \dots, \alpha_p$ , що максимізують відстань Махаланобіса. Для цього розв'яжемо систему рівнянь типу

$$\alpha_1 S_{11} + \alpha_2 S_{12} + \dots + \alpha_p S_{1p} = \mu_{11} - \mu_{21},$$

$$\alpha_1 S_{21} + \alpha_2 S_{22} + \dots + \alpha_p S_{2p} = \mu_{12} - \mu_{22},$$

.....

$$\alpha_1 S_{p1} + \alpha_2 S_{p2} + \dots + \alpha_p S_{pp} = \mu_{1p} - \mu_{2p},$$

де  $S_{ip}$  — відповідні елементи матриці коваріацій.

$$0,51\alpha_1 + 0,23\alpha_2 + 0,33\alpha_3 = 4,9 - 3,79 = 1,14,$$

$$0,23\alpha_1 + 0,51\alpha_2 + 0,27\alpha_3 = 4,7 - 3,96 = 0,74,$$

$$0,33\alpha_1 + 0,27\alpha_2 + 0,58\alpha_3 = 4,8 - 3,91 = 0,89.$$

У результаті розв'язання цієї системи рівнянь отримуємо:

$$\alpha_1 = 1,754997, \quad \alpha_2 = 0,498667, \quad \alpha_3 = 0,30381.$$

Дискримінантна функція має вигляд:

$$Z = \alpha_{11}x_1 + \alpha_{12}x_2 + \dots + \alpha_{ip}x_p,$$

або  $Z = 1,75x_1 + 0,5x_2 + 0,3x_3.$

Математичне сподівання дискримінантної функції для кожного класу (дискримінантна функція розраховується для кожного об'єкта обох класів):

$$\xi_i = \sum_{j=1}^p \alpha_j \mu_{ij}, \quad \xi_1 = 12,38, \quad \xi_2 = 9,79,$$

$$\xi_{\text{сєр}} = \frac{E1 + E2}{2} = 11,08.$$

Проведемо визначення границь класів:

$$K = \ln \frac{q_2 C(1/2)}{q_1 C(2/1)} = \ln \frac{0,317 \cdot C(1/2)}{0,683 \cdot C(2/1)} = -0,77.$$

Загальна процедура класифікації Байєса полягає у визначенні відношення  $X$  до  $W_1$ , якщо

$$\sum_{j=1}^p \alpha_j x_j < \frac{\xi_1 + \xi_2}{2} + \ln \frac{q_2 C(1/2)}{q_1 C(2/1)},$$

і до  $W_2$ , якщо

$$\sum_{j=1}^p \alpha_j x_j \geq \frac{\xi_1 + \xi_2}{2} + \ln \frac{q_2 C(1/2)}{q_1 C(2/1)},$$

$$\frac{\xi_1 + \xi_2}{2} + \ln \frac{q_2 C(1/2)}{q_1 C(2/1)} = 11,08 - 0,77 = 10,31$$

Отже, якщо значення дискримінантної функції  $Z = 1,77x_1 + 0,37x_2 + 0,26x_3$  більше ніж 10,31, об'єкт буде віднесений до класу  $W_1$  (студенти, які закінчать

вуз із червоним дипломом) і до класу  $W_2$  в іншому випадку.

Ця процедура мінімізує помилкову вартість неправильної класифікації.

Визначимо дисперсії дискримінантної функції:

$$\sigma_z^2 = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p a_{ij} s_{ij} a_{ij} = 2,585,$$

$$\Delta^2 = D^2 = \frac{(\xi_1 - \xi_2)^2}{\sigma_z^2} = \frac{6,71}{2,585} = 2,595.$$

Отримаємо ймовірність помилкової класифікації.

Найчастіше обчислення параметрів розподілу не представляє труднощів. Складною є оцінка ймовірності помилкової класифікації.

Якщо параметри розподілів відомі, значення ймовірностей помилкової класифікації  $\text{Pr}(2/1)$  і  $\text{Pr}(1/2)$  подаються формулами

$$\text{Pr}(2/1) = \Phi \left( \frac{K - \frac{1}{2} \Delta^2}{\Delta} \right). \quad (1)$$

$$\text{Pr}(1/2) = \Phi \left( \frac{-K - \frac{1}{2} \Delta^2}{\Delta} \right). \quad (2)$$

Якщо параметри розподілів невідомі, для їх оцінки можна застосувати кілька методів.

**Метод 1.** Оскільки  $D^2$  є оцінкою  $\Delta^2$ , у формулах (1) і (2) можна замінити  $\Delta^2$  на  $D^2$ . Треба зазначити, що такі оцінки будуть зміщеними, тобто дійсна ймовірність помилкової класифікації буде в середньому більшою, ніж така оцінка. Перевагою методу є простота таких оцінок: їх легко одержати за результатами роботи програми.

**Метод 2.** Цей метод полягає в класифікації кожного елемента вибірки обсягом  $n_1$  з популяції  $W_1$  і вибірки обсягом  $n_2$  із  $W_2$ . Якщо  $m_1$  — число спостережень із  $W_1$ , віднесених до  $W_2$ , і  $m_2$  — число спостережень з  $W_2$ , класифікованих у  $W_1$ , то  $\text{Pr}(2/1) = m_1/n_1$  і  $\text{Pr}(1/2) = m_2/n_2$ . Цей метод дає більше зміщення, ніж попередній, і, якщо програмою не виводяться значення дискримінантної функції для кожного спостереження, шим важко користуватися.

**Метод 3.** Цей метод полягає в поділі вибірки з  $n_1$  спостережень з популяції  $W_1$  на дві підвибірки. Спостереження з першої підвибірки використовуються для обчислення дискримінантної функції, а члени другої підвибірки класифікуються відповідно до процедур, отриманої за першою підвибіркою. Частка невірно класифікованих об'єктів є оцінкою ймовірності помилкової класифікації. Цей метод дає незміщені оцінки, але вони мають більші дисперсії, ніж оцінки, отримані за першими двома методами. Інший недолік цього методу полягає в тому, що не існує стандартного способу розподілу вибірки.

**Метод 4.** Lachenbruch (1967) запропонував процедуру «ковзного екзамену». З першої вибірки включається перше спостереження, і дискримінантна функція будується за рештою спостережень. Потім класифікується виключене спостереження. Процедура повторюється для кожного члена першої вибірки. Частка невірно класифікованих об'єктів є оцінкою величин  $Pr(2/1)$ . Та сама процедура застосовується до другої вибірки для оцінки  $Pr(1/2)$ . Методом Монте-Карло Lachenbruch, Mickey (1968) показали, що зсув таких оцінок досить малий.

**Метод 5.** Цей метод аналогічний методу 1, тільки оцінка  $D^2$  замінюється на  $\Delta^2$ .

Застосовуючи перший метод, отримаємо:

$$Pr(2/1) = \Phi\left(\frac{K - \frac{1}{2}D^2}{\Delta}\right).$$

$$Pr(1/2) = \Phi\left(\frac{-K - \frac{1}{2}D^2}{\Delta}\right).$$

$$Pr(2/1) = \Phi(-0,806) = 0,19.$$

$$Pr(1/2) = \Phi(-0,806) = 0,19.$$

За використання такої процедури 19 % потенційних відмінників після першої сесії виявлені не будуть і 19 % потенційних звичайних студентів будуть визнані як ті, що отримують червоний диплом.

Об'єдналимо апостеріорні ймовірності. У багатьох випадках не потрібно відносити об'єкт до тієї чи іншої популяції і знаходити ймовірності помилкової класифікації, а більш важливо знайти апостеріорні ймовірності приналежності об'єкта популяції  $W_1$  чи  $W_2$ . Для відомих багатовимірних нормальних розподілів популяцій апостеріорна ймовірність того, що об'єкт належить до  $W_1$ , має вигляд

$$Pr(W_1/x) = \frac{1}{1 + \frac{q_2}{q_1} \exp\left(-z + \frac{\xi_1 + \xi_2}{2}\right)}.$$

Для апостеріорної ймовірності виконується рівність

$$Pr(W_2/x) = 1 - Pr(W_1/x).$$

Використовуючи оцінки параметрів, можна замінити  $\xi_i$  на  $\bar{Z}_i$ ,  $i = 1, 2$ :

$$Pr(W_1/x) = \frac{1}{1 + \frac{0,5}{0,5} \exp\left(-z + \frac{12,38 + 9,79}{2}\right)}.$$

де  $Z = 1,75x_1 + 0,5x_2 + 0,3x_3$ .

### 3. Висновки і перспективи застосування результатів дослідження

Використовуючи побудовану модель прогнозування якості навчання (на прикладі прогнозу віднесення студента за результатами першої сесії до категорії студентів, які закінчать вуз із червоним дипломом), можна здійснювати корекції в освіті.

Комплекс заходів для корекції подальшої успішності студентів містить у собі:

- надсилання батькам студентів листів із зазначенням не тільки результатів навчання студента на кожному етапі і його поточних оцінок, але й тенденції успішності;
- обговорення питань успішності на розширених засіданнях комісій із запрошенням батьків;
- формування навчальної мотивації;
- розвиток професійних інтересів;
- розроблення індивідуальних перспективних планів роботи студента;
- проведення додаткових занять за дисципліною з метою більш доступного викладання складного матеріалу;
- прогнозування кінцевих рівнів навчальних досягнень студентів.

Діагностування якості знань і умінь студентів має потребу в систематичному відстеженні ступеня навченості з метою поетапного вирішення навчальних задач, установлення її усунення прогалин в застосованому матеріалі з наступною корекцією в ході навчального процесу і прогнозуванням змісту і технології навчання. Аналіз успішності навчання виявляє певні закономірності в діяльності викладачів і студентів, дослідження яких дозволяє побудовувати стратегію подальших дій. У цьому сенсі студент постає не тільки як об'єкт навчальних дій, але і як суб'єкт в організації навчального процесу.

Систематичне відстеження якості навчання у великого числа студентів сприяє одержанню більш об'єктивної, достовірної оцінки, що дозволяє прогнозувати кінцеві рівні навчальних досягнень студентів, проектувати плани навчання. Процес навчання за таких умов стає не тільки відстежуваним, але й цілеспрямованим.

**Список літератури:** 1. Афіфи А., Эйзен С. Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ / Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — 488 с. 2. Шамша Б. В., Гуржій А. М., Дудар З. В., Левикін В. М. Математичне забезпечення ІУС. — Х.: ТОВ «Компанія СМІТ», 2005. — 448 с.

Надійшла до редколегії 20.11.2006

УДК 004.032.26

И. В. Новосельцев, Н. Г. Аксак, О. Ю. Барковская

## ВЕРОЯТНОСТНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

### 1. Введение

В последнее время существенно возросло значение информационного обеспечения самых разных медицинских технологий. В рамках исследования искусственного интеллекта созданы многочисленные экспертные системы для медицинской диагностики и обследования пациентов, для проведения генных и молекулярных исследований.

Диагностика, или задача классификации, относится к основным и обширным группам медико-биологических задач. В диагностике кожных заболеваний большое значение имеет визуальный метод обследования.

На сегодняшний день очень остро стоит проблема диагностики злокачественных новообразований — таких, как меланома кожи, своевременное выявление которой позволяет предотвратить возникновение рака кожи.

Существенную роль в диагностике играют особенности медико-биологической информации. Большинство медицинских данных имеют описательный характер, выражаются с помощью формализмов, подверженных изменчивости. Данные, даже выражаемые с помощью чисел, также в большинстве случаев не могут быть хорошо упорядочены в классифицированы, так как изменяются в зависимости от клинических традиций различных школ, геосоциальных особенностей регионов и даже отдельных учреждений, а также с течением времени.

В данной работе решаются задачи классификации на примере медицинской диагностики.

### 2. Анализ новейших исследований и публикаций

Неявные задачи медицины и биологии явились идеальным полем для применения нейросетевых технологий, и именно в этой области наблюдается наиболее яркий практический успех нейронной информации. Наибольший интерес для практического здравоохранения представляют системы для диагностики и дифференциальной диагностики заболеваний. При этом для принятия решений могут использоваться самые разнообразные данные: анамнез, клинический осмотр, результаты лабораторных тестов и сложных функциональных исследований. Список областей медицины, в которых начали применяться новые технологии, весьма обширен и продолжает расти.

Одним из наиболее интенсивно развиваемых направлений является применение нейросетей в кардиологии.

В Италии разработана чрезвычайно интересная экспертная система для диагностики и лечения артериальной гипертензии [1].

Примером программы диагностики служит пакет кардиодиагностики, разработанный фирмой RES Informatica совместно с Центром кардиологических исследований в Милане. Программа позволяет осуществлять независимую кардиодиагностику на основе распознавания спектров тахограмм. Тахограмма представляет собой гистограмму интервалов между последовательными сердечными ритмами, а ее спектр отражает баланс активностей симпатической и парасимпатической нервной системы человека, специфически изменяющейся при различных заболеваниях [2].

В работе [3] рассматривается нейросетевая экспертная система для диагностики и лечения кровяного давления. Авторы описали структуру из трех модулей, соединенных в гиперсеть. Каждый модуль ориентирован на решение и представление определенной задачи.

В Японии была разработана система диагностики, помогающая выявить и классифицировать заболевания кровеносных артерий [4]. Многослойная нейронная сеть обратного распространения имеет 256 входных элементов (16×16-матрица сжатого изображения), 5–140 элементов в скрытом уровне и восемь выходов. Один выход соответствует нормальному диагнозу, и семь выходов определяют различные типы отклонений.

Лабораторией медицинской информатики и нейросетевых технологий КрасГМА разработаны следующие экспертные системы на основе нейронных сетей: прогнозирование исхода беременности и осложнений родов; прогнозирование осложнений инфаркта миокарда; моделирование лечения и прогнозирование его непосредственных результатов у больных облитерирующим тромбангиитом; дифференциальная диагностика «острого живота»; ранняя диагностика злокачественных опухолей сосудистой оболочки глаза; прогнозирование осложнений и исходов цирроза печени [5].

В [6] представлена разработка экспертной системы диагностики резких болей в животе, цель которой — облегчить принятие решений, которые сложно сделать человеку. Большое количество методов нейронных сетей были рассмотрены для решения этой проблемы.

Анализ публикаций показывает, что применение нейронных сетей в медицине постоянно растет и показывает великолепные результаты, помогая врачам правильно устанавливать диагноз широкого круга заболеваний.

### 3. Постановка задачи

В работе классифицируются три вида кожных трансформаций: меланома, лентиго, невус.

Невус — доброкачественное пигментное новообразование кожи, научное название всем известных родинок, представляющих собой скопление меланоцитов, внешне похожих на большие темные бородавки.

Симптомы «активизации» невуса: увеличение размеров опухоли; изменение окраски; появление «чувства» невуса (он начинает мешать, беспокоить, становится заметен самому пациенту); появление вокруг опухоли папилломатозных разрастаний; выпадение волос с поверхности невуса; неровный контур опухоли; увеличение невуса более 6 мм в диаметре; появление вокруг опухоли сателлитных образований; изъязвление или кровоточивость невуса.

На рис. 1 показано развитие меланомы из невуса. На снимке слева виден неравномерно окрашенный невус неправильной формы. На правом снимке, сделанном через 5 лет, прослеживается увеличение пигментации и изменение формы невуса. Период злокачественного перерождения невуса в меланому составляет от нескольких месяцев до многих лет.

Под меланомой понимают опухоль высокой степени злокачественности, состоящую из атипичных меланоцитов полиморфного строения с различным содержанием пигмента (пример меланомы приведен на рис. 1 справа).

Меланوما — одна из самых распространенных форм рака кожи и самая опасная. Смертность от нее достигает 80 процентов.

Соотношение меланомоопасных невусов к меланомоопасным составляет 1:10. Клиническая оценка невусов необходима для того, чтобы отличить первый тип невуса от второй его разновидности. Если у пациента подозревается меланомоопасный вид невуса, то необходимо полное его удаление.

Лентиго — плоские, слегка возвышающиеся над поверхностью кожи пятна темно-коричневого цвета диаметром 1,5–3 мм. Лентиго относят к пигментным невусам (рис. 2).

При злокачественном лентиго, которое чаще всего образуется на щеках у пожилых людей, пятна увеличиваются до 2 см в диаметре и могут изменять свою пигментацию. Этот вид лентиго является одной из разновидностей злокачественной меланомы и не распространяется на другие участки кожи.

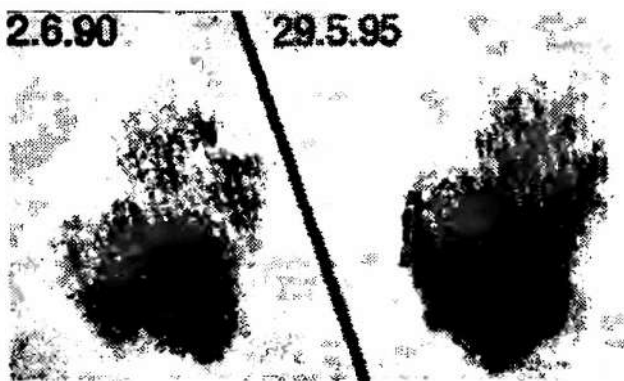


Рис. 1. Развитие меланомы из невуса

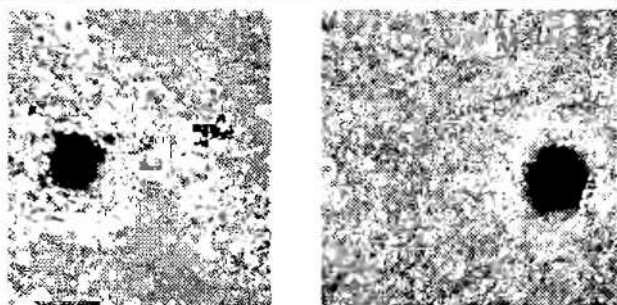


Рис. 2. Лентиго

Клиническая классификация выделяет три формы меланомы. По происхождению меланомы делятся на три группы:

- меланомы из невусов;
- лентигомеланомы;
- меланомы «de novo» — образовавшиеся на интактной коже. Развиваются из отдельных нормальных меланоцитов. Часть из них малопигментна или беспигментна.

Как уже было сказано, диагностика меланомы на ранней стадии имеет чрезвычайно важное значение.

Процесс определения диагноза выглядит следующим образом. Общение с пациентом проходит в форме консультации. В процессе консультации выявляются симптомы заболевания. Обследуемому предлагается ответить на вопросы. На основании ответов на вопросы и по обработке изображений кожных образований ставится диагноз. В постановке диагноза существенную роль играет обработка фотоснимков кожных изменений (рис. 3).

В экспериментальных исследованиях предполагается наличие двух снимков: первоначальный снимок заболевания и снимок, сделанный в день обследования. В результате сравнения снимков, сделанных с интервалом во времени, делается вывод о развитии болезни.

Таким образом, в процессе консультации формируется «вектор опроса»  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ , который является входным вектором нейронной сети. Результаты анализа обработки изображения кожного заболевания являются одним из компонентов этого вектора.

Нейронная сеть определяет принадлежность вектора к одному из четырех классов — «меланомы», «лентиго», «невус», «болезнь не определена». Затем производится обработка полученной информации и вывод диагноза в удобном для пользователя виде.

Функционирование нейросетевой экспертной системы схематически представлено на рис. 4.

В качестве классификатора использовались архитектуры нейронных сетей: многослойный персептрон (МП); вероятностная базисная сеть (PNN — probabilistic neural network).

#### 4. Алгоритм обработки изображения

Изображение обрабатывается в несколько этапов. На вход поступают два масштабированных изображения — первоначальный снимок заболевания

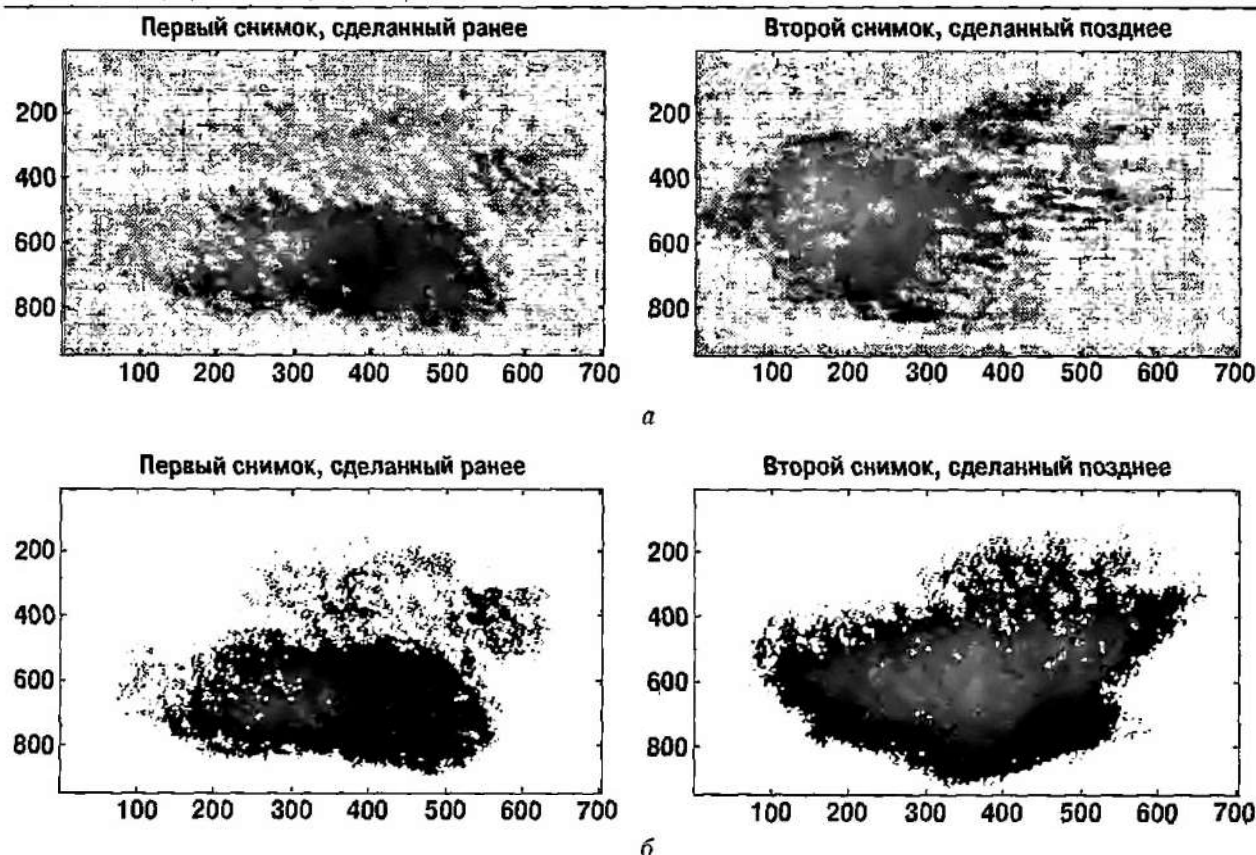


Рис. 3. Обработка снимков: а — изображения, подлежащие обработке; б — обработанные изображения

и более поздний снимок, сделанный в момент последнего обследования пациента.

Производится перевод изображений в черно-белую палитру.

Вычисляется процентное соотношение размера пятна предполагаемой болезни (для двух снимков).

На основе процентного соотношения делается вывод — прогрессирует пятно или нет.

Таким образом, производится формирование векторов, поступающих на вход НС.

### 5. Сравнительный анализ многослойного персептрона и вероятностной базисной сети

Рассмотрим основные отличительные особенности выбранных НС.

Скрытый слой в сетях вероятностной нейронной сети является невыпуклым, а выходной линей-

ным. В то же время скрытые и выходной слои многослойного персептрона, используемого в качестве классификатора, являются выпуклыми.

Аргумент функции активации каждого скрытого узла сети РNN представляет собой евклидову норму (расстояние) между входным вектором и центром радиальной функции. В то же время аргумент функции каждого скрытого узла МП — это скалярное произведение входного вектора и синаптических весов данного нейрона.

МП обеспечивает глобальную аппроксимацию нелинейного отображения. С другой стороны, сеть РNN с помощью экспоненциального уменьшения локализованных нелинейностей (функций Гаусса) создает локальную аппроксимацию нелинейного отображения [7].

#### 5.1. Многослойный персептрон

В данной работе использовался МП с архитектурой  $N_1 - N_2 - N_k$ , где  $N_1$  — количество нейронов во входном слое,  $N_2$  — количество нейронов в скрытом слое,  $N_k$  — количество нейронов в выходном слое (рис. 5).

Функционирование  $M$ -го слоя определяется следующим соотношением:

$$y_k^{qM} = f_1 \left( \sum_{l=1}^{S^M} w_{kl}^M y_l^{q(M-1)} \right), \quad (1)$$

где  $S^M$  — количество нейронов в слое;  $y_k^{qM}$  —  $k$ -й элемент вектора выхода слоя  $M$  для элемента выборки с номером  $q$ .



Рис. 4. Схема функционирования нейросетевой экспертной системы

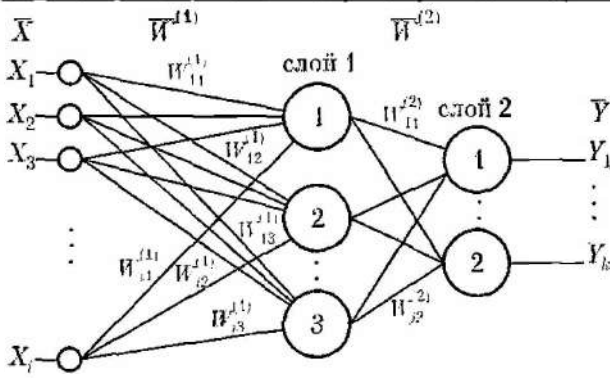


Рис. 5. Многослойный персептрон

Настройка весов  $w_{ij}^{M-1}$  определяется соотношением

$$\frac{\partial J}{\partial w_{ij}^{M-1}} = -\sum \Delta_i^{q(M-1)} y_j^{q(M-2)} \quad (2)$$

где

$$\Delta_i^{q(M-1)} = \left( \sum_{k=1}^{S^M} \Delta_k^{qM} \right) f_{M-1}'(n_i^{q(M-1)}), \quad (3)$$

$i=1, S^{M-1}$ ,  $n$  — количество входов.

### 3.2. Нейронная сеть на базе PNN-сети

В данной работе использовалась PNN-сеть с архитектурой, изображенной на рис. 6.

Функционирование сети описывается следующим образом:

$$z_i = \exp \left[ \frac{-D_i}{2\sigma^2} \right] \quad (4)$$

где  $D_i = (x - u_i)^T (x - u_i)$  — расстояние между входным вектором  $x$  и обучающим вектором  $u_i$  из классифицируемой категории;  $\sigma$  — параметр сглаживания. Функция оценки плотности распределения  $f_j(x)$  для класса  $s$  второго слоя нейронной сети вычисляется по формуле:

$$f_j(x) = \frac{1}{(2\pi)^{p/2} \sigma^p n \sum_{i=1}^n z_i} \quad (5)$$

где  $n$  — размерность входного вектора.

### 6. Основные результаты и выводы

Проведен сравнительный анализ работы многослойного персептрона и вероятностной нейронной сети.

В ходе тестирования получена оценка нейронной сети на базе многослойного персептрона и PNN-сети. Функционирование экспертной системы апробировано на репрезентативной тестовой выборке. Результаты проведенных экспериментов приведены в таблице.

По результатам тестирования, ошибка вычисления для многослойного персептрона составляет 0,024, для вероятностной сети — 0,008.

Таким образом, наиболее целесообразным является построение нейросетевой экспертной системы на базе PNN-сети.

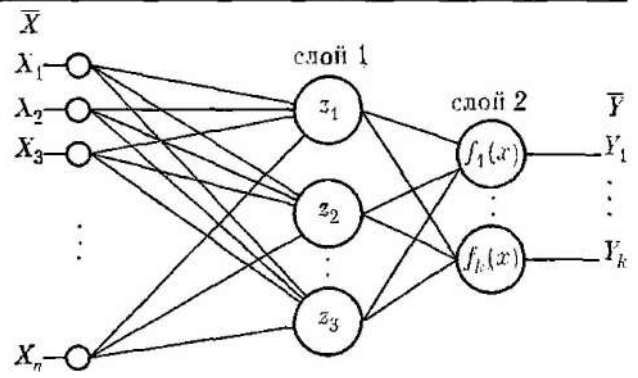


Рис. 6 PNN-сеть

Построение экспертной системы позволяет:

- выявлять тяжелое заболевание на ранней стадии и провести своевременное лечение;
- сократить время самой диагностики больных, что является актуальным для данной предметной области;
- использовать данную систему в телемедицине.

### Результаты тестирования

Имя-вальный класс	Количество тестовых примеров	Результат классификации (кол-во определенных классов)							
		MPP				PNN			
		1	2	3	4	1	2	3	4
1	50	48	0	0	2	50	0	0	0
2	50	0	48	0	2	0	49	0	1
3	50	0	0	50	0	0	0	50	0
4	50	1	0	1	48	1	0	0	49

Список литературы: 1. Россиев Д. А. Медицинская нейронная информатика. — <http://cache.peterhuk.ru/dap/zheng/pnlinks/book2/gl5.htm>. 2. Ежов А., Четкин В. Нейронные сети в медицине // Открытые системы. — 1997. — № 4. — С. 34–37. 3. Poli R., Cagnoni S., Livi R. et al. A Neural Network Expert System for Diagnosing and Treating Hypertension // Computer. — 1991. Vol. 24, No. 3. — P. 64–71. 4. Application of artificial neural network to computer-aided diagnosis of coronary artery disease in myocardial SPECT bull's-eye images // J. Nuclear Medicine. — Vol. 33, Issue 2 — P. 272–276. 5. Нейронные сети — <http://tu334.narod.ru/04Neuro.htm>. 6. Pesonen E., Ikonen J., Juhola M., Eskelinen M. Experimental construction of a neural network-based decision support system for acute abdominal pain. — <http://www.cs.nku.fi/~epesonen/research/construction.html>. 7. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс, 2-е изд. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. — 1104 с. 8. Сафонов В. О. Экспертные системы — интеллектуальные помощники специалистов. СПб.: Санкт-Петербургская организация общества «Знание» России 1992. 9. Мирлес Е. М. Учебное пособие по курсу «Нейронная информатика». — Красноярск, 2002. 10. Johns P. B. A symmetrical condensed node for the TLM method // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. — Apr. 1997. — Vol. MTT-35 — P. 370–377. 11. Experimental construction of a neural network-based decision support system for acute abdominal pain. — <http://www.cs.nku.fi/~epesonen/research/construction.html>.

Поступила в редакцию 22.09.2006

УДК 681.3.016

О. М. Цимбал

## ПОДАННЯ ЗНАТЬ У СИСТЕМАХ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ РОБОТІВ

### 1. Вступ

У спеціальній літературі існують різні думки з приводу того, яким чином визначити поняття робота. Зокрема, навчальна література з робототехніки радянського періоду, наприклад [1], визначає робота як універсальний автомат для відтворення моторних та інтелектуальних функцій людини. Японські дослідники визначають робота багатьма способами, зокрема у [3] наводиться визначення робота як пристрою, здатного самостійно переміщуватися в просторі, вирішувати завдання аналізу сцен та розпізнавання образів, який має велику кількість ступенів рухливості, спроможний аналізувати середовище за допомогою зворотних зв'язків, а також прогнозувати ситуації, спираючись на власний досвід та наявну інформацію.

Наведені визначення є вірними, якщо врахувати потенційні можливості роботів та робототехніки як науки, здатної у технічний спосіб реалізувати зростаючі можливості таких суміжних галузей, як прикладна математика, штучний інтелект та системи зв'язку. А поки що спеціалісти в галузі баз знань [2] констатують, що робототехніка є інженерною наукою, яка не заперечує технології штучного інтелекту, але не готова до їх впровадження з різних причин. Отже, дослідження в галузі застосування методів штучного інтелекту в робототехніці є актуальними з теоретичної та практичної точки зору.

Метою запропонованої статті є аналіз загальних особливостей систем керування роботів, реалізації систем прийняття рішень, розгляд подання даних та знань у таких системах.

### 2. Особливості систем керування роботів

Як відомо, на цей час розрізняють три покоління роботів [1, 4]:

- роботи з жорсткою схемою керування, або програмовані маніпулятори, до яких належать майже всі сучасні промислові роботи;
- адаптивні роботи з сенсорними пристроями, повільно знаходять застосування у промисловості;
- інтелектуальні роботи (роботи, здатні до самоорганізації) — мета робототехніки.

Різниця між поколіннями роботів пролягає, головним чином, в організації системи керування маніпулятором, яка складається з декількох рівнів [4].

На рівні окремої робочої ланки робота забезпечується керування двигуном, який здійснює рух

однієї або декількох ступенів рухливості. За допомогою центрального процесора системи керування організується координована робота приводів маніпулятора. При цьому вхідною інформацією є послідовність положень затискача маніпулятора або пов'язаного з ним об'єкта. Траєкторія захоплювального пристрою зазвичай задається двома способами: шляхом безпосереднього завдання людиною-оператором у процесі навчання або за допомогою планування рухів на більш високому рівні керування, у тому числі за допомогою методів штучного інтелекту.

На рівні планування рухів передбачається, що відомими є кінцева мета руху та опис робочої сцени. Пристрій керування, який забезпечує впрішнення завдань цього рівня, має спланувати рух таким чином, щоб із заданого початкового положення забезпечити досягнення мети маніпулятором і виконати додаткові умови на перенесення, наприклад оминути перешкоди на робочій сцені [4].

У багатьох випадках неможливо повністю запрограмувати рух маніпулятора. Прикладом є технологічна операція збирання. Неточне подання, встановлення деталей або їх дефектність може призвести до помилки у виконанні жорстко налаштованої програми. Щоправда, вказані особливості можна контролювати за допомогою засобу адаптації — системи технічного зору (СТЗ). Інформацію від СТЗ можна використати для корекції руху маніпулятора або для її прораховування. Таким чином, виникає ще один зовнішній контур керування, який забезпечує пристосування робота до змінюваних умов функціонування. Систему керування, що працює на вказаних принципах, можна віднести до рівня адаптивного керування [4].

На всіх рівнях керування відбувається взаємодія між роботом та людиною-оператором. В одних випадках допускається безпосередня участь людини у процесі керування. Тобто робот може функціонувати й у автономному режимі, але за певних умов роботи необхідна корекція рухів, супроводжувана аналізом ситуації, нарешті, необхідним є досвід людини — керування може бути передано оператору робота. Саме до цієї групи належать системи дистанційного керування для виконання різноманітних робіт в екстремальних умовах — за підвищеного рівня радіації, під водою, у космосі. Такі системи відносять до ергатичних (людино-машинних) маніпуляційних систем.

До другої групи належать автономні робототехнічні системи, здатні певний час після навчання функціонувати без участі оператора. При цьому останній виконує функції програмування попереднього навчання робота руху за заданою траєкторією або функції керування затискачем у реальному часі (у напівавтоматичних системах). В адаптивній системі керування робота оператора завершується до початку функціонування системи. Він визначає можливі варіанти змін умов роботи, установлює відповідні датчики й складає алгоритми адаптації, які дозволять системі функціонувати автоматично в межах визначених допусків на параметри.

Натомість під час роботи з інтелектуальними робототехнічними системами можливості оператора суттєво збільшуються. Оператор може використовувати наявний (і не тільки власний) досвід під час попереднього планування дії робота, застосовуючи програмне забезпечення. Таким чином, мова може йти про використання методів експертних систем. Експерти можуть залучатися для розв'язання завдань опису зовнішнього світу у випадках невизначеності, а також для завдань розпізнавання образів. Указані методи можуть застосовуватися і для керування роботами в реальному часі.

Використання методів експертних систем передбачає залучення зберігання знань у відповідності до моделей. Реалізація моделей визначатиме характер роботи системи керування робота як структурному, так і в процедурному плані.

### 3. Реалізація систем прийняття рішень роботів

З практичної точки зору, реалізація систем керування інтелектуальними роботами в багатьох аспектах виходить з робіт щодо проекту STRIPS (Stanford Research Institute Problem Solver) — системи прийняття рішень для замкнутого світу робота, що взаємодіяла із виконавчою системою PlanEx (plan execution — виконання планів).

Для розв'язання практичних завдань прийняття рішень роботами необхідно автоматично формувати абстрактні простори різних рівнів з базового простору об'єктів та подій, у якому функціонує система.

У STRIPS-подібних системах [5] абстрактні простори визначаються рівнем деталізації умов застосування операторів. Такий підхід дозволяє:

- залишати незмінною модель світу — немає необхідності викреслювати з неї несуттєві (для даного рівня абстракції) деталі та не враховувати їх;
- задіяти незмінні операторні схеми.

Модель світу подається у вигляді набору правильно побудованих формул (ППФ) логіки предикатів першого порядку, що відображають собою

факти (наприклад,  $ATR(a)$  — робот знаходиться у пункті  $a$ ) та закони, наприклад:

$$(\forall y)(\forall z)\{[ATR(y) \& (y \neq z)] \supset \overline{ATR}(z)\},$$

тобто робот не може знаходитись одночасно в пунктах  $y$  та  $z$ .

Операторна схема визначається найменуванням, списком параметрів та описами у вигляді ППФ мови логіки предикатів першого порядку умов застосування дії та результату дії. Останній, у свою чергу, містить список викреслювань та список додавання. Оператори породжують різні моделі світу шляхом генерування нових фактів. Мета системи також подається у вигляді ППФ тієї ж логіки, тобто вона є бажаною для ППФ системи.

У системі STRIPS пошук починається зі спроби вивести цільову формулу  $G_0$  з вихідної моделі світу  $M_0$ . Для цього програма доведення теорем здійснює пошук протиріччя в множині диз'юнктивів  $\{M_0 \cup \overline{G}_0\}$ . Якщо таке протиріччя знайдене (вводиться порожній диз'юнктив), то вихідне завдання вирішується на цьому кроці тривіальним чином, тобто вихідна модель  $M_0$  задовольняє меті  $G_0$ . Якщо ж вказане протиріччя не погоджується, формується так званий незавершений вивід  $D_0$ . Цей вивід подається набором диз'юнктивів, відповідних запереченню формули мети (у даному випадку  $\overline{G}_0$ ), плюс усі їх похідні, якщо такі є, мінус ті диз'юнктиви, що виключаються завдяки застосуванню обмежуючих стратегій (наприклад, стратегії заміщення та оцінки предикатів).

Незавершений вивід  $D_0$  приймається у якості різниці між  $M_0$  та  $G_0$ , що зв'язується з данім вузлом  $(M_0, G_0)$ . Далі відбувається пошук операторів, які підходять для зменшення отриманої різниці. Це такі оператори, дія яких на модель середовища дозволяє продовжувати доведення. У процесі пошуку найбільш придатного оператора значення його параметрів піддаються частковому або повному перебору.

Пошук оператора складається з двох кроків. На першому кроці складається упорядкований список операторів-кандидатів. Вибір операторів-кандидатів оснований на простому порівнянні предикатів з різницею  $D_0$  з предикатами зі списку доповнення оператора. Другий крок полягає у застосуванні програми доведення теорем для визначення того, чи є у вказаному списку доповнень диз'юнктив, що могли б продовжити вивід після застосування цього оператора. Якщо цей крок видався успішним, оператор-кандидат із відповідними значеннями параметрів розглядається як придатний для зменшення різниці  $D_0$ .

Коли таким чином оператор-кандидат знайдений, умови його застосування приймаються у якості нових підцілей системи. Нехай перед роботом поставлене завдання — перейти в точку  $b$ . Тоді  $G_0 = ATR(b)$ , й до

тих пір, поки робот не опиниться в точці  $b$ , спроби знайти необхідний доказ виявляться марними. Вочевидь, що окремий випадок  $goto(m, b)$  оператора  $goto(m, n)$  — перейти з пункту  $m$  у пункт  $n$  — підходить для зменшення різниці  $D_0 = \bar{G}_0$ , оскільки результат —  $ATR(b)$  дозволяє продовжити вивід  $G_0$  (у даному випадку — й закінчити його). Роль нової підцілі  $G_1$  гратиме відповідна схема ППФ — умова застосування, скажімо,  $ATR(m)$ .

Система STRIPS чинить з підціллю  $G_1$  так само, як і з метою. Вона знову використовує доведення теорем для виводу  $G_1$  з  $M_0$ . Тут важливі два випадки. Якщо система не знаходить доказ, вона аналогічним чином формує різницю  $D_1$  між  $M_0$  та  $G_1$  і встановлює підцілі, відповідні формулам умов застосування відповідних операторів-кандидатів. Якщо теорема виводить  $G_1$  з  $M_0$ , то відповідний окремий випадок оператора використовується для перетворення моделі  $M_0$  у нову модель  $M_1$ . У вищезгаданому простому прикладі підціллю є  $G_1 = ATR(m)$ . Якщо  $ATR(a) \in M_0$ , окремий випадок  $G_1$ , а саме  $ATR(a)$ , може бути виведений з  $M_0$ . У цьому випадку оператор  $goto(a, b)$  застосовується до моделі  $M_0$  і формує модель  $M_1$ , що включає  $ATR(b)$ . Потім STRIPS продовжує спроби вивести  $G_0$  з  $M_1$ . У нашому прикладі  $G_0$  тривіально випливає з  $M_1$ . Однак, якщо вивід  $G_0$  не вдається, встановлюються відповідні підцілі й процедура починається знову [5]. Описаний вище підхід реалізує логічну модель подання знань.

Проблемне середовище системи планування містить модель світу, набір операторних схем та мету (або набір цілей) системи. У випадку постановки задачі для мобільного робота в замкненому просторі світ робота повинен відповідати схемі розташування об'єктів у цьому просторі, наприклад рис. 1.

#### 4. Подання даних та знань у системах прийняття рішень

Реалізуючи на практиці вказану вище схему, можна описати всі її компоненти: модель світу, операторні схеми та мету системи. Зокрема, мовою

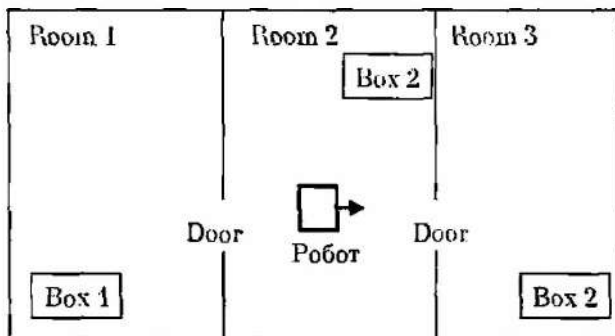


Рис. 1. Приклад схеми розташування об'єктів для системи планування робота

Prolog [6] модель світу, відповідна рис. 1, може бути описана набором тверджень:

```
is_a(room1,room,always)
is_a(room2,room,always)
is_a(room3,room,always)
is_a(door12,door,always)
is_a(door23,door,always)
is_a(box1,object,always)
is_a(box2,object,always)
is_a(box3,object,always)
connects(door12,room1,room2,always)
connects(door23,room2,room3,always)
stands(door12,opened,now)
stands(door23,opened,now)
is_in(box1,room1,now)
is_in(box2,room2,now)
is_in(box3,room3,now)
is_in(robot,room2,now)
is_at(robot,door12,now)
```

Неважко зрозуміти зміст бази даних. Вона формується відношеннями:  $is\_a$  — приналежність об'єкта до класу,  $connects$  — поєднання двох об'єктів третім (двох кімнат дверима),  $stands$  — стан об'єкта (дверей),  $is\_in$  — місцезнаходження об'єкта (ящика або робота в кімнаті),  $is\_at$  — взаємне розташування одного об'єкта біля іншого. Слід зауважити, що такий опис повинен виключати протиріччя, для чого необхідно забезпечити спеціальну процедуру.

З точки зору реалізації бази знань робота, вказаний набір фактів поділяється на дві основні частини — статичну й динамічну. Факти статичної частини містять ключове слово «always» і залишаються незмінними в процесі роботи, факти ж динамічної частини можуть додаватися та вилучатися в процесі виконання програм і містять ключове слово «now».

Операторні схеми систем планування представляють описи дій, що можуть виконуватися в межах моделі світу. Для мобільного робота це можуть бути дії: відкрити (закрити) двері, перейти у кімнату  $N$ , перейти до об'єкта  $M$ , пересунути об'єкт  $P$  до об'єкта  $Q$  тощо. Кількість описів залежить від ступеня складності завдань робота.

Кожна операторна схема практично містить у собі:

- 1) твердження про результат реалізації операторної схеми — події, яку забезпечує схема;
- 2) тест виконання — перевірку відсутності реалізованого цільового факту;
- 3) тест валідності — перевірку придатності операторної схеми для забезпечення мети завдання;
- 4) список передумов — постановку (і виконання) умов, що передують виконанню дії;
- 5) список видалення — список подій, що застаріють на момент виконання схеми;

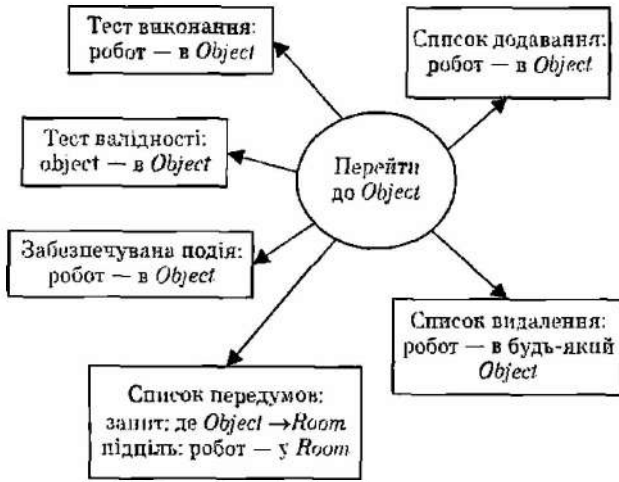


Рис. 2. Структура опису дії у системі планування мобільного робота

б) список додавання — список подій, що вносять-ся операторною схемою.

Схематично опис операторної схеми дії *Перейти до Object* представлений на рис. 2.

З точки зору баз знань, операторна схема подібного типу відповідає фреймовій моделі подання знань і фактично є фреймом-сценарієм. Особливістю фрейму-сценарію є визначеність послідовності виконання такого фрейму як набору полів фрейму — слотів (приклад наведено на рис. 3). Слід також вказати на наявність у кожного слота такого фрейму приєднаних функцій (у термінології фреймів — демонів), виконання яких означає заповнення відповідного слота фрейму значенням.

Таким чином, система прийняття рішень робота складатиметься з бази даних, набору фреймів-сценаріїв, які реалізують операторні схеми, механізму прийняття рішень та мети (або набору цілей) програми. Отримані в ході прийняття рішень результати можуть демонструватися за допомогою дво- або тривимірного комп'ютерного моделювання та бути виконані після відповідного тестування безпосередньо системою керування маніпулятором промислового робота. Схема підсистеми прийняття рішень зображена на рис. 4.

Назва фрейму дії	Перейти до <i>Object</i>
Тест виконання	Робот — в <i>Object</i>
Тест валідності	<i>Object</i> — <i>Object</i>
Забезпечувана подія	Робот — в <i>Object</i>
Виконання списку передумов	Запит: де <i>Object</i> → <i>Room</i> Підціль: робот — у <i>Room</i>
Список додавання	Робот — в <i>Object</i>
Список видалення	Робот — у будь-якій <i>Object</i>

Рис. 3. Приклад подання операторної схеми за допомогою фрейму

Мета системи формулюється у вигляді бажаного факту, до якого система повинна перейти, наприклад:

```
plan (is_at (box1, box2, now)),
```

де *plan* — предикат, що забезпечує досягнення поставленої мети — знаходження поруч об'єктів *box1* та *box2*.

Окрім вказаних компонентів проблемної області, у системі планування необхідно реалізувати власне вирішувач. Вирішувачем може бути предикат або набір предикатів — у випадку реалізації мовою Prolog [5], або набір відповідних функцій — у випадку реалізації на C++ (автором реалізовані обидві схеми).

Як вже вказувалося, завдання у системі формулюється в якості бажаного факту стану системи. Якщо такий факт не знаходиться у базі даних (тест виконання), викликається вирішувач, що реалізує схему пошуку рішення. Пошук рішення передбачає:

1) пошук предикатної схеми, яка відповідає поставленому завданню (у тому числі перевірку валідності);

2) виконання списку передумов;

3) виконання списку викреслення;

4) виконання списку додавання.

Слід урахувати, що при виконанні списку передумов (звичайно, якщо такий визначено) досягнення підцільей проводиться за допомогою рекурсивного виклику вирішувача, що вимагає чітких умов виходу з рекурсії.

Іншим рівнем розробки систем керування інтелектуальних роботів є розробка підсистем адаптації промислових роботів, зокрема систем технічного зору. Тут дослідників зустрічає досить великий набір проблем, пов'язаний із початковою обробкою інформації, її розпізнаванням та ідентифікацією. Однак,

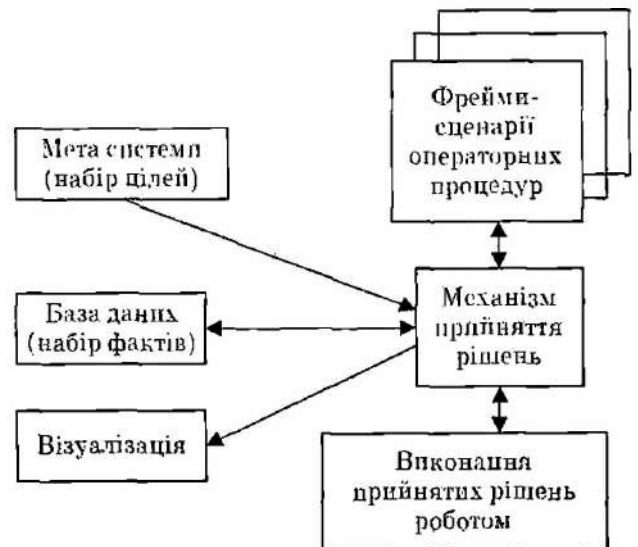


Рис. 4. Варіант реалізації підсистеми прийняття рішень інтелектуального робота

з точки зору побудови систем прийняття рішень, і тут необхідно виходити на рівень подання знань про стан робочої зони робота. При цьому слід виходити з наявності певних ознак об'єктів у робочій зоні, наприклад:

- належність об'єкта робочої зони до певного класу;
- стан об'єкта;
- абсолютні або відносні координати об'єкта;
- рівень пріоритету об'єкта;
- можливість перенесення системи координат до певного об'єкта.

Таким чином, із кожним об'єктом можна пов'язати фрейм із описом, що має вводити до бази даних системи прийняття рішень та використовується у стандартному режимі.

Як висновок, з точки зору реалізації системи прийняття рішень, пропонується:

- у загальній схемі прийняття рішень інтелектуального робота користуватися логічною моделлю подання знань;
- для опису операторних процедур системи прийняття рішень формувати структуру, відповідні фреймовій моделі;
- формування бази даних про робоче середовище робота вести також на основі фреймової моделі;
- вести проектування програмного забезпечення засобами високого рівня, зокрема за допомогою мови програмування Prolog.

### 5. Перспективні напрямки досліджень

До перспективних напрямків розвитку описаної вище системи прийняття рішень (планування) інтелектуального робота слід віднести, по-перше, розширення проблемної області. Таке розширення призведе до зростання операторних схем та їх

ускладнення. У випадках, коли одна мета може бути досягнута декількома шляхами, виникне необхідність попередньої оцінки складності операторної схеми. При цьому кожній схемі з набору, що забезпечує однакові цілі, відповідатиме певний коефіцієнт, а сам набір буде нечіткою множиною. По-друге, функціонування роботів у реальному часі вимагатиме поліпшення процедур знаходження адекватних операторних схем, у тому числі з урахуванням алгоритмів «відкату», відновлення попереднього ступа предметної області. По-третє, розширення проблемної області визначатиметься розширенням кола операцій, виконуваних роботом, а послідовність виконання операцій (технологічний процес) визначатиме стратегію дій робота.

У межах тематики статті ведеться розробка системи прийняття рішень промислового робота РМ-01 на операціях транспортування та збирання. Керування роботом здійснюється від ПЕОМ, ідентифікація об'єктів у робочій зоні проводиться системою технічного зору робота.

Список літератури: 1. Воробьев Е. И., Попов С. А., Шевелева Г. И. Механика промышленных роботов: В 3 кн. Кн. 1: Кинематика и динамика. — М.: Высшая школа, 1988. — 304 с. 2. Гаврилова Т. А., Хоросhevский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. — СПб.: Питер, 2001. — 384 с. 3. Вакано Э. Введение в робототехнику. — М.: Мир, 1988. — 334 с. 4. Зенкевич С. Л., Юценко А. С. Основы управления анимационными роботами. — М.: Изд. во МГТУ, 2004. — 480 с. 5. Люгер Дж. Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. — М.: ИД «Вильямс», 2003. — 894 с. 6. Малласс Дж. Реляционный язык Пролог и его применение. — М.: Наука, 1990. — 464 с.

Надійшла до редакції 08.09.2006

УДК 519.713

О. А. Нестеренко, Е. Ю. Глубокая, О. Н. Ледеха

## МОДЕЛИ, МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КЛАССИФИКАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

### 1. Введение

Принятие решений (ПР) занимает одно из ведущих мест в профессиональной деятельности человека и его повседневной жизни. Ввиду усложнения задач ПР и необходимости их решения в слабоструктурированных проблемных областях повысилась роль подготовительных этапов, которые во многом определяют качество принимаемых решений. Эффективным средством помощи являются интеллектуальные системы поддержки принятия решений (ИСППР), позволяющие осуществлять информационную и аналитическую поддержку лица, принимающего решение (ЛПР), на основании информации, отражающей знания и опыт экспертов.

Конструктивное решение задач ПР с помощью компьютерных систем связано с формированием в ходе диалога с ЛПР некоторого принципа выбора наилучшего решения. На сегодняшний день широкое распространение получило применение принципов выбора, основанных на сведениях многокритериального выбора к однокритериальному на основании теории полезности. Для формирования такого принципа выбора от ЛПР должна быть получена информация о целях и критериях выбора, важности этих критериев. При отсутствии непосредственной помощи экспертов выполнение этих этапов является достаточно сложной задачей, что требует детальной проработки вопросов информационного обеспечения ПР, т. е. разработки такой модели проблемной области, которая бы позволила учесть существующие закономерности и достаточно объективно описать проблемную ситуацию.

В работе предлагается интегрированная концептуальная классификационная модель (ИККМ) альтернатив, которая обеспечивает повышение объективности описания альтернатив в слабоструктурированных проблемных областях: любую, в том числе достаточно высокую, степень детализации при анализе проблемы выбора: возможность учета существенных свойств альтернатив, существующих зависимостей и отношений на альтернативах, их составе и свойствах.

Анализ существующих средств классификационного моделирования — классификационной среды Protege и инструментария MISClass — показал их недостаточную эффективность для реализации ИККМ альтернатив. В работе предлагается новый, более подходящий для такого моделирования инструментарий, основанный на использовании принципов объектно-ориентированного подхода с использованием функциональности и мощи СУБД Oracle.

Целью исследования является повышение качества моделирования многокритериальных задач ПР за счет использования интеллектуальных программных средств классификационного моделирования.

Цель работы обуславливает следующие задачи исследования:

- для повышения качества моделирования многокритериальных задач принятия решений в слабоструктурированных проблемных областях на основании системологического подхода разработать концептуальную классификационную модель для описания класса однотипных задач принятия решений;
- провести анализ и рассмотреть пути усовершенствования программных средств информационной подготовки решений на основе использования концептуальных классификационных моделей альтернатив принятия решений.

### 2. Требования к моделированию

#### многокритериальных задач принятия решений

Процесс многокритериального ПР состоит из нескольких этапов информационной подготовки ПР и выбора наилучшего решения  $A_0 = \{a_j, j \in \overline{1, n_a}\}$  на исходном множестве  $A^R$  альтернатив в соответствии с принципом выбора  $S$ . Достаточно популярным на сегодня является принцип выбора, основанный на аддитивной функции полезности  $A_0 = \max_{a_j \in A^R} \sum_{i=1}^{N^{opt}} \alpha_i * K_i(a_j)$ , где  $\alpha_i$  — весовой коэффициент, задающий относительную важность критерия  $K_i \in K^{opt}$ , из кортежа  $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{N^{opt}}\}$ ;  $K_i(a_j)$  — критериальная оценка альтернативы  $a_j$ ;  $K^{opt} = \{K_i\}_{i=1}^{N^{opt}}$  — множество критериев. Использование аддитивной функции полезности требует проведения структурной идентификации, во время которой формируется множество критериев  $K^{opt}$ , и параметрической идентификации кортежа  $\alpha$ . Выбор  $K^{opt}$  в значительной мере обуславливает эффективность ПР, но до сих пор является результатом использования знаний и интуиции экспертов. Повышение эффективности этого этапа требует: формализации требований (полноты, действительности и др.), выдвигаемых к  $K^{opt}$ : использования информации о пераприд критериев  $K$ , которая может быть построена как проекция дерева целей  $S$  на множество свойств  $P$  альтернатив. Значительные трудности все еще возникают у ЛПР во время определения коэффициентов из кортежа  $\alpha$ . Повышение эффективности

этого этапа требует учета в  $\alpha$  информации из иерархия критериев  $K$  (Т. Саати) и существующих отношений на свойствах  $P$  альтернатив.

Получение во время описания задачи ПР информации, которая позволит достичь максимальной эффективности решения, и ее оптимальное представление составляют суть информационной подготовки ПР. В отличие от принятого описания множества  $A^R$  для конкретных задач выбора, моделирование области ПР, точнее универсального (максимально широкого) множества альтернатив в ней  $A^R (A^R \subset A^U)$ , может обеспечить подготовку и эффективное решение всего класса  $\langle A^L, C \rangle$  однотипных в такой области задач ПР. Вопросы информационной подготовки классов задач ПР исследованы недостаточно. В условиях сложности непосредственного привлечения к выбору специалистов по ПР такая подготовка требует учета информации об альтернативах и их свойствах, возможных целях и критериях, существующих зависимостях.

Таким образом, необходима модель описания многокритериальных альтернатив, которая должна:

- содержать описание всего требуемого для ПР множества альтернатив, т. е. являться моделью так называемого универсального множества  $A^L$  альтернатив в заданной проблемной области;
- содержать описание альтернатив в структурированном виде, позволяющем использовать их в качестве моделей-оснований для проведения декомпозиции целей и в ходе критериального описания задачи ПР;
- содержать описание существенных свойств альтернатив, на базе которых возможно достижение компромисса между полнотой и простотой критериального описания выбора;
- позволять получать действенные (содержательно возможные) объединения свойств альтернатив для минимизации критериального описания задачи;
- содержать экспертные оценки важности свойств альтернатив для поддержки ЛПР в процессе определения коэффициентов важности критериев;
- содержать описание альтернатив, опирающиеся на понятийную систему человека, которые будут одинаково хорошо понятны как эксперту, так и ЛПР.

### 3. Классификационные модели для описания многокритериальных задач принятия решений

Описание универсального множества  $A^L$  альтернатив проводилось на основании системологического классификационного анализа (СКА) [1], что позволило разработать ИККМ альтернатив [2], удовлетворяющую выше перечисленным требованиям. Разработка классификационной модели велась в направлении максимального ее приближения к естественной классификации [1], которая является общепризнанной формой выражения знаний об объективных зависимостях в проблемных областях. Для этого в качестве корня такой модели рассматривалось понятие-категория об универсальном мно-

жестве альтернатив, позволяющее определить весь класс альтернатив в области ПР. Благодаря использованию классификационного подхода такая модель позволяет задавать конкретные альтернативы с помощью единичных понятий. Возможность добавлять описания новых альтернатив без изменения структуры модели предоставляется благодаря заданию общих понятий об альтернативах-классах. В терминологии объектно-ориентированного подхода также альтернативы-классы должны являться конкретными, а не абстрактными классами с целью их дальнейшего описания на основании отношения «часть-целое».

Использование СКА, основанного на учете системного отношения поддержания функциональной способности целого, позволило получить основания для выделения существенных свойств альтернатив. Согласно системологии [1], под существенным свойством необходимо понимать такое, которое является поддерживающим для существования самой системы. Носителями таких поддерживающих свойств в системах являются их подсистемы (функциональные элементы), сформировавшиеся в составе систем для обеспечения соответствующих поддерживающих функций. Таким образом, задание существенных свойств альтернатив связано с описанием их функционального состава. Для этого в ИККМ альтернатив, наряду с классификацией, задающей родовидовые отношения между классами альтернатив, каждая альтернатива была описана партитивной классификацией [2], которая задает функциональные элементы в составе альтернативы и партитивные отношения между ними.

Для использования в ходе критериального описания проблемы выбора ИККМ альтернатив должна содержать описание не только существенных с точки зрения функционального назначения свойств альтернатив, но и тех, которые могут рассматриваться ЛПР как важные для учета других (не функциональных) аспектов. Такие свойства, в отличие от существенных, проявляются в результате взаимодействия нескольких функциональных элементов в составе альтернативы, которые могут располагаться на различных партитивных уровнях альтернативы. В связи с необходимостью учета взаимной зависимости свойств для критериального описания выбора предложено при описании несущественных свойств также задавать их взаимосвязь с функциональными элементами альтернатив. Использование таких производных свойств, заданных на нескольких функциональных элементах из состава альтернативы, позволит заменить группу критериев, сформированных на основании существенных свойств альтернатив, некоторым обобщающим критерием и тем самым минимизировать критериальное описание выбора.

Математическое описание ИККМ альтернатив  $A^L$  проведено на основании аппарата теории графов с использованием закономерностей построения

естественной классификации. Формализованных Е. А. Соловьевой [1]. Математическая ПККМ альтернатив получена в виде сложного графа:

$$A^U = A \cup \{E_k^m A_s^i\}_{m=1, n=1, t=1, s=1}^{N(a_s^i), N^m(a_s^i), N, N^i} \cup$$

$$\cup \{PK(a_j^i)\}_{i=1, j=1}^{N, N^i} \cup \{C_h^g(a_j^i)\}_{g=1, i=1, j=1}^{N(a_j^i)-1, N^g(a_j^i), N, N^i}$$

где  $A = (VA, DA)$  — родовидовая классификация (РВК) альтернатив с множеством вершин  $VA = \{ \langle a_j^i, B(E_j^1(a_j^i)) \rangle \}_{i=1, j=1}^{N, N^i}$ , задающая альтернативы и их функциональные назначения  $B(E_j^1(a_j^i))$  ( $N^1 = 1$  — на первом уровне иерархии находится один объект  $a_j^1$  — альтернатива-класс, который описывает универсальное множество альтернатив);  $DA$  — множество дуг, задающее отношение  $IS_A$  («род-вид»); на рис. 1 граф задан на белых вершинах и выделен жирными линиями;  $E_k^m A_s^i = \{ \langle E_k^m(a_s^i), B(E_k^m(a_s^i)), r(E_k^m(a_s^i)), P_k^{Sm}(E_k^m(a_s^i)) \rangle \}_{i=1, j \in J_s}^N$  — множество ФЭ типа  $E_k^m(a_s^i)$  из состава альтернатив  $a_j^i$ , являющихся видами альтернативы  $a_s^i$  ( $j \in J_s$ ), где для каждого ФЭ  $E_k^m(a_s^i)$  задано его функциональное назначение  $B(E_k^m(a_s^i))$ , соответствующее существенное свойство  $P_k^{Sm}(E_k^m(a_s^i))$  и весовой коэффициент  $r(E_k^m(a_s^i))$ , который может быть выявлен на основании отношения «>» старшинства между существенными свойствами:

$$\sum_{k=1}^{N^m(a_j^i)} r(E_k^m(a_j^i)) = r(E_l^{m-1}(a_j^i)) \quad (k \in K_l)$$

$$r(E_k^m(a_j^i)) / r(E_n^m(a_j^i)) = k / n; \quad r(E_1^1(a_j^i)) = 1;$$

$DE_k^m A_s^i$  — множество дуг, которое задает отношения «род-вид»  $IS_A$  на ФЭ: родовидовые классификации ФЭ представлены на рис. 1 графами с серыми вершинами и дугами;  $PK(a_j^i) = (VPK(a_j^i), DPK(a_j^i))$  — паритивная классификация (ПК) альтернативы  $a_j^i$ , где  $VPK(a_j^i) = \{ \langle E_k^m(a_j^i), B(E_k^m(a_j^i)), r(E_k^m(a_j^i)), P_k^{Sm}(E_k^m(a_j^i)) \rangle \}_{m=1, k=1}^{N(a_j^i), N^m(a_j^i)}$  — множество вершин графа, задающее множество ФЭ альтернативы;  $DPK(a_j^i)$  — множество дуг, задающее отношения «часть-целое»  $PART\_OF$  между альтернативой  $a_j^i$  и ее ФЭ: дуги совокупности графов  $PK(a_j^i)$ , задающих паритивные классификации альтернатив, обозначены на рис. 1 тонкими черными линиями;  $C_h^g(a_j^i) = (VC_h^g(a_j^i), DC_h^g(a_j^i))$  — граф, задающий производное свойство альтернативы  $a_j^i$  на множестве вершин  $VC_h^g(a_j^i) = VC_h^{g,1}(a_j^i) \cup VC_h^{g,2}(a_j^i)$ , где множество  $VC_h^{g,1}(a_j^i) = \{ P_h^{Cg}(a_j^i) \}$  описывает само производное свойство  $P_h^{Cg}(a_j^i)$ , а  $VC_h^{g,2}(a_j^i) = \{ E_k^m(a_j^i) \}$  ( $m \in [2, N(a_j^i)]; k \in [1, N^m(a_j^i)]$ ) задает подмножество функциональных элементов, на базе которых формируется производное свойство:  $DC_h^g(a_j^i)$  — множество дуг графа; пример такого дерева представлен на рис. 1 пунктирными линиями.

Использование в ходе разработки структуры ПККМ альтернатив СКА позволило:

- повысить уровень объективности описания альтернатив в слабоструктурированных проблемных областях за счет использования в качестве основания ПККМ альтернатив родовидовой классификации, приближенной к естественной;

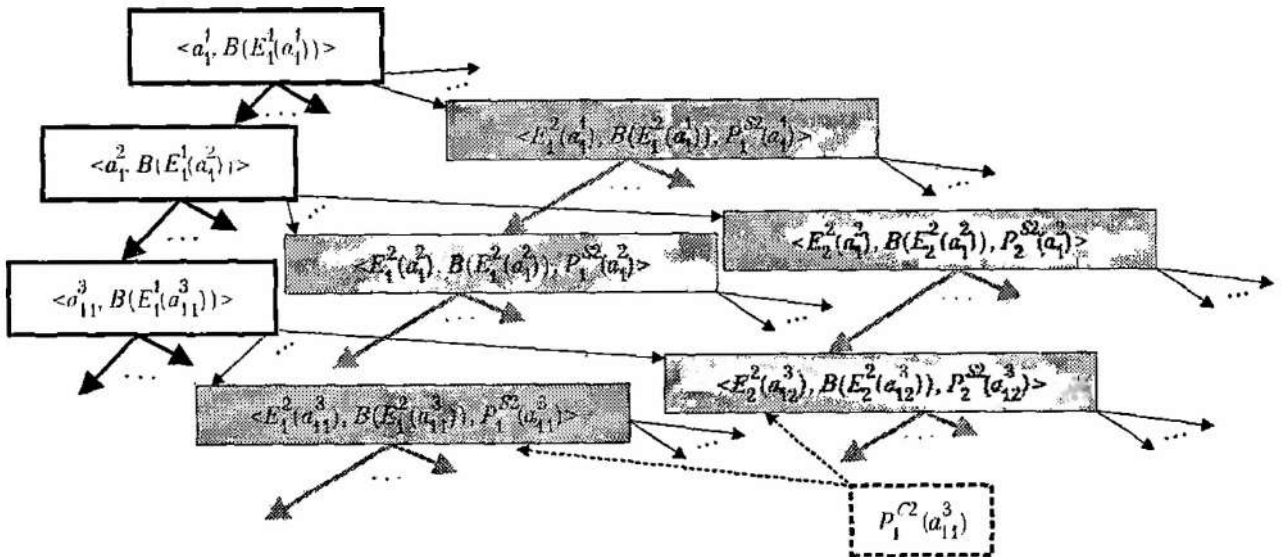


Рис. 1. Схематическое представление фрагмента ИККМ альтернатив

- обеспечить различный, в том числе достаточно высокий, уровень детализации при анализе проблем за счет задания функционального состава альтернатив в виде партитивных классификаций;
- учесть существенные свойства альтернатив;
- обеспечить возможность задания критериального описания выбора с учетом требований [3], выдвигаемых к обоснованному множеству критериев, за счет установления на существенных свойствах альтернатив иерархических отношений и задания несущественных (производных) свойств альтернатив на основании их функциональных элементов, что позволяет заменять группы существенных свойств некоторыми объединяющими свойствами;
- получать возможность задания экспертной информации о важности критериев с учетом объективных закономерностей, заложенных в ИККМ альтернатив [3].

#### 4. Описание метода информационной подготовки многокритериальных решений

Для задания многокритериальных альтернатив в слабоструктурированных проблемных областях был предложен метод информационной подготовки многокритериальных решений на основании ИККМ альтернатив [3]. Создание такой модели, при необходимости, требует анализа не только определенных понятий, но и их описаний. Построение ИККМ альтернатив представляет собой итерационный процесс, что связано с необходимостью создания целого ряда классификаций. В связи с этим сами альтернативы, расположенные в вершинах партитивных классификаций, рассматривались как главная классифицируемая совокупность систем, в то время, как каждое множество выделенных одноименных функциональных элементов рассматривалось как дополнительная совокупность систем.

Таким образом, метод информационной подготовки многокритериальных решений включает следующие основные этапы:

- 1) построение родовидовой классификации альтернатив принятия решений;
- 2) выделение в составе альтернатив функциональных элементов и организация на их основании уровня в партитивных классификациях альтернатив из родовидовой классификации (на следующих итерациях алгоритма — выделение партитивного состава у подсистем альтернатив); задание на выделенных функциональных элементах отношения порядка с учетом их функциональной важности в составе альтернативы;
- 3) построение родовидовых классификаций функциональных элементов альтернатив, заданных на ранее выделенном уровне партитивных классификаций;
- 4) задание новых уровней партитивных классификаций альтернатив и построение родовидовых классификаций их новых функциональных элементов на этапах 2–3, а также коррекция с учетом новых

результатов полученных ранее классификаций, начиная с родовидовой классификации альтернатив;

- 5) задание с учетом функционального состава альтернатив их свойств.

Развитый с учетом системологического классификационного анализа [1] метод информационной подготовки многокритериальных решений может быть использован при создании концептуальных классификационных моделей проблемных областей произвольной природы, которые смогут составить надежную информационную основу для баз знаний систем ПР.

#### 5. Анализ инструментальных средств классификационного моделирования

Классификационная среда Protege разработана лабораториями Stanford Knowledge Systems и Stanford Medical Informatics (Stanford University of USA) в 2001 году с целью объединить знания ученых в единую классификационную систему для дальнейшего использования в научных и образовательных целях [научный доклад Stanford University]. Среда Protege является фреймовой системой. Онтологии в Protege включают машинно-интерпретируемые формулировки основных понятий предметной области, отношения между ними и представляются в интуитивно понятной человеку форме — деревом элементов (понятий).

Классификационная среда Protege имеет множество достоинств, которые могут помочь проектировщику классификаций в их разработке, а именно: декларативно описывает классификации, определяя явным образом, какова классовая иерархия и к каким классам принадлежат понятия (классы); описывает внутреннюю структуру понятий с помощью слотов; имеет возможность накладывать ограничения на слоты с помощью факетов; имеет понятную, четко определенную структуру; поддерживает процесс итерационного классификационного моделирования; поддерживает разработку таких иерархических структур, как родовидовые или партитивные классификации.

Однако Protege имеет некоторые ограничения, не позволяющие полностью реализовать ИККМ альтернатив:

- не предоставляет общего шаблона проектирования, каждая онтология строится специфично, классификация понятий может приводиться на различных основаниях в зависимости от специфики предметной области и целей дальнейшего использования;
- не предоставляет проектировщику возможности задавать партитивные связи между понятиями разных классификаций явно, а только опосредовано (через слоты);
- отсутствуют средства моделирования специфических для ИККМ альтернатив элементов, например, весовых коэффициентов важности элементов альтернатив, системы параллельных РВК понятий и их функциональных назначений и т. п.

Программный инструментальный MISClass разработан в Харьковском национальном университете радиоэлектроники на кафедре программного обеспечения ЭВМ для реализации некоторых элементов ПККМ альтернатив [4]. Инструментарий позволяет:

- поддерживать разработку таких иерархических структур, как родовидовые и партитивные классификации, причем каждая моделируемая система участвует в структурах обоих видов (см. рис. 2);
- наряду с понятиями о самих системах-альтернативах и их элементах моделируются также понятия об их функциональных назначениях и родовидовые отношения в них;
- сущностные свойства систем представляются в инструментарию как пара, состоящая из формулировки свойства и его значения у того или иного объекта; свойства формируются автоматически с учетом структуры системы, однако в инструментарию отсутствуют средства задания производных свойств.

В составе инструментария также частично реализованы средства приобретения знаний, основанные на предложенном методе информационной подготовки принятия решений. Разработанные средства предоставляют эксперту следующие возможности в процессе построения ПККМ альтернатив:

1. Облегчена процедура задания новых ФЭ и организация на их основании нового уровня в ПК альтернатив: эксперту предоставляется структурированное описание родительской альтернативы, на основании которой путем уточнения ранее заданных ФЭ может быть задана структура новой альтернативы.

2. Эксперту предоставляется возможность добавления новых элементов в состав альтернатив на основании унаследованных от родительской альтернативы. Разработанные средства поддерживают организацию РВК о функциональных элементах при их добавлении в состав альтернативы.

3. При добавлении новых элементов в состав альтернатив эксперту предлагается расположить такой элемент с учетом отношения старшинства на соответствующих свойствах. Наряду с определением порядка ФЭ в составе альтернатив ему предлагается задать также и весовой коэффициент важности соответствующих ФЭ.

4. Параллельно с добавлением в РВК альтернатив описаний новых альтернатив происходит добавление их свойств. При этом сущностные свойства формируются автоматически с учетом формальной процедуры их формирования на основании формулировок соответствующих ФЭ.

База знаний по альтернативам принятия решений

База знаний Родовидовая классификация Партитивная классификация Работа со свойствами

<p><b>Родовидовая классификация</b></p> <p>Название системы-класса</p> <p>Стратегия дифференцирования</p> <p><b>Родительское понятие для системы-класса</b></p> <p>Конкурентная стратегия</p> <p><b>Видовые понятия системы-класса</b></p> <p>Стратегия дифференцирования продукта Стратегия дифференцирования услуг Стратегия дифференцирования имиджа Стратегия дифференцирования каналов распределения</p> <p><b>Функциональное назначение системы-класса</b></p> <p>Укрепить конкурентные позиции по качеству продукции и услуг</p>	<p><b>Свойства системы-класса</b></p> <p><b>Существенные свойства системы-класса</b></p> <p>Конкурентное преимущество</p> <p>Стратегическая зона хозяйствования Конкурентная позиция компании Конкурентное преимущество</p> <p><b>Значение существенного свойства</b></p> <p>Преимущество по качеству продукции и услуг</p> <p><b>Несущественные свойства системы-класса</b></p> <p>Желательный тип компании</p> <p>Требования относительно соответствия стратегии ситуации в Желательный тип компании Размер охватываемой стратегической зоны хозяйствования</p> <p><b>Значение несущественного свойства</b></p>										
<p><b>Партитивная классификация</b></p> <p><b>Понятие об элементе-классе</b></p> <p>Стратегия дифференцирования</p> <p><b>Понятие о целой системе-классе</b></p> <p><b>Понятия о частях элемента-класса</b></p> <p>Зона продвижения продукции и услуг Позиция, позволяющая улучшить качество продукции и услуг Преимущество по качеству продукции и услуг</p> <p><b>Функциональное назначение элемента-класса</b></p> <p>Укрепить конкурентные позиции по качеству продукции и услуг</p>											
<p><b>ТЕКУЩИЙ СЕАНС РАБОТЫ</b></p> <table border="1"> <tr> <td>Проблемная область</td> <td>Подобласть</td> <td>Версия</td> <td>Год</td> <td>Имя базы знаний</td> </tr> <tr> <td>Маркетинг</td> <td>Конкуренция</td> <td>4</td> <td>2002</td> <td>Стратегии</td> </tr> </table>		Проблемная область	Подобласть	Версия	Год	Имя базы знаний	Маркетинг	Конкуренция	4	2002	Стратегии
Проблемная область	Подобласть	Версия	Год	Имя базы знаний							
Маркетинг	Конкуренция	4	2002	Стратегии							

Рис. 2. Пример создания ПККМ маркетинговых стратегий в среде MISClass

## 6. Требования к программному инструментарию создания ИККМ альтернатив

Анализ ряда средств классификационного моделирования показал их недостаточную эффективность для реализации ИККМ альтернатив. Исходя из этого обстоятельства, предлагается разработать новый, более подходящий для классификационного моделирования ИККМ инструментарий. Для организации хранения такой структуры целесообразно выбрать средства, позволяющие многократно использовать созданные модели и достаточно простым и прозрачным образом преобразовывать их в структуру, необходимые для решения конкретных задач. Это обеспечит универсальность и расширяемость системы. С этой целью в основу программного инструментария должна быть положена СУБД, в частности, СУБД Oracle (фирмы Oracle).

Реализуемая в СУБД база данных должна иметь объектную модель представления. В этом случае возможность добавлять описания новых альтернатив без изменения структуры модели предоставляется благодаря заданию общих понятий об альтернативах-классах. В терминологии объектно-ориентированного подхода такие альтернативы-классы должны являться конкретными, а не абстрактными классами с целью их дальнейшего описания на основании отношения «часть – целое».

Помимо этого инструментарий должен быть многопользовательским, так как разработка отдельных РВК не требует согласованных действий различных экспертов. Таким образом, СУБД Oracle максимально подходит для решения данной задачи, а также для обеспечения расширяемости проектируемой системы.

Итак, основными требованиями к разрабатываемому программному инструментарию являются: поддержка всех особенностей ИККМ альтернатив; наличие удобного общего подхода к проектированию — реализация моделирования ИККМ на основании метода информационной подготовки решений [3, 4]; поддержка иерархических структур двух видов — родовидовой и партитивной; задание классификаций декларативным образом; реализация базы данных на основании объектно-ориентированного подхода; использование для реализации СУБД Oracle.

В ходе разработки нового программного инструментария могут быть внесены изменения и доработки, однако основные принципы и идеи, перечисленные выше, останутся неизменными.

## 8. Заключение

Во время исследования были получены следующие результаты:

1. Для моделирования однотипных многокритериальных задач принятия решений предложена интегрированная концептуальная классификационная модель универсального множества альтернатив, обеспечивающая структурированное описание альтернатив для однотипных в проблемных областях задач принятия решений за счет использования метода системологического классификационного анализа. Разработанная модель может быть использована как единая информационная основа многокритериальных задач принятия решений за счет более объективного и структурированного предоставления информации, необходимой на основных этапах процесса принятия решений.

2. Предложен метод информационной подготовки решений, позволяющий получать содержательные ИККМ альтернатив в произвольных слабоструктурированных проблемных областях.

3. Проведен анализ ряда средств классификационного моделирования и предложены требования к созданию нового программного инструментария для моделирования ИККМ альтернатив.

Список литературы: 1. Соловьева Е. А. Естественная классификация: системологические основания. — Харьков: ХТУРЭ, 1999. — 222 с. 2. Нестеренко О. О., Широкопетлева М. С. Застосування класифікаційних моделей в інтелектуальних системах // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2005. — № 4/2(16). — С. 113–118. 3. Нестеренко О. А. Метод поддержки декомпозиции целей принятия решений на базе классификационной модели описания альтернатив // АСУ и приборы автоматики. — 2001. — № 116. — С. 70–77. 4. Нестеренко О. А., Соловьева Е. А. Применение системологического классификационного анализа при создании интеллектуальных систем поддержки принятия решений // Проблемы бионики. — 2001. — № 54. — С. 88–95.

Поступила в редакцию 19.09.2006

## КАРКАС ПОБУДОВИ МАНОК-СИСТЕМ

### 1. Вступ

Прискорення процесу інтеграції України у світовий інформаційний простір та підтримка випереджального розвитку національного навчально-орієнтованого кіберпростору вимагають розроблення та широкого впровадження інноваційних інформаційних технологій «навчальні об'єкти» (ІТНО). Застосування ІТНО також спрямоване на підтримку трансформації та удосконалення традиційної парадигми навчання, переозброєння всіх учасників навчання, освіти і тренування, поліпшення та збагачення їх компетенцій, сприяння більш якісній реалізації навчальних потреб, вимог і попиту кожного індивідуума, групи, організації, спільноти.

Позначимо символом S цілеспрямований розвиток інноваційних ІТНО. Він є динамічним складним наукомістким об'єктом, що базується на створенні та багаторазовому використанні нового знання. Новою науково-технічною проблемою вважаємо таку: «Як краще визначити та підтримати S?». Загальною методологічною базою для дослідження та моделювання S є інформаційний підхід, системний аналіз, лексикографічні та дидактичні теорії, математичний апарат категоріального аналізу. Зазначимо, що суттєвою характеристикою лексикографічних теорій є вивчення та використання результатів універсального явища (феномена, процесу) — «лексикографічного ефекту в інформаційних системах». За визначенням вважатимемо, що лексикографічна теорія є такою концептуальною побудовою, суттєвою характеристикою якої є вивчення та багаторазове використання результатів лексикографічного ефекту в інформаційній системі [1]. У 1998 році було запропоновано нову концептуальну ідею — використання лексикографічних композитів для побудови інформаційно-комп'ютерних систем [1].

У попередніх статтях автора, присвячених розробці лексикографічної теорії побудови МАНОК\*-систем на S, зокрема, описано:

- концептуальні ідеї побудови МАНОК-систем (далі позначені KI-МАНОК(), зокрема, KI-МАНОК = оптимізувати S у формі визначеного процесу, DP; KI-ШИРОКОВА) [2, 3], каркас вербального опису KI-МАНОК (ідеї та принципи визначення S у вигляді комбінацій кіберпросторів eldS, ldS, dS на S; вищого рівня модель (BPM) для KI-МАНОК-семантик [3]);

- принципи побудови МАНОК-систем (<ІННОВАЦІЙНІСТЬ<sup>1-3</sup>>, <ВИЗНАЧЕНІСТЬ<sup>1-2</sup>>, <УСВІДОМЛЕННЯ<sup>1-2</sup>>, ІВУ-принципи) [2, 4, 5];
- каркас побудови МАНОК [5–7] та системні конструктиви моделювання на контенті МАНОК-систем на S [8];
- вербальне визначення МАНОК-систем [4], формальне визначення МАНОК-системи вищого рівня абстракції та реалізаційну функціональну архітектуру високого рівня [8].

Нижче описано каркас побудови МАНОК-систем.

### 2. Постановка задачі Z<sup>S, FĀ</sup>

Постановка задачі з розроблення каркаса побудови МАНОК-систем (задачі Z<sup>S, FĀ</sup>) записується в такому вигляді:

$$DP^{S, F\hat{A}}: \langle \langle S^{<IBV>} \rangle, \langle MOD \rangle, \langle S \rangle, \langle S \rangle, \langle F\hat{A} \rangle, \langle FA \rangle \rangle \quad (1)$$

$$DP^S: \langle \hat{S}^{\ell, tax} \rangle \rightarrow \langle \hat{S}^{\ell', tax'} \rangle \rightarrow \langle F\hat{A}la \rangle \quad (2)$$

$$DP^S: \langle \hat{S}^{\ell, tax} \rangle \rightarrow \langle S^{\ell', tax'} \rangle \rightarrow \langle F\hat{A}la \rangle \quad (3)$$

$$DP^{F\hat{A}}: \langle F\hat{A}la \rangle \rightarrow \langle F\hat{A}la' \rangle \quad (4)$$

$$DP^{FA}: \langle F\hat{A}la \rangle \rightarrow \langle FA\ell a'' \rangle \quad (5)$$

$$\langle S^{<IBV>} \rangle \subseteq \langle S \rangle \quad (6)$$

$$DP \subseteq \langle \langle eldS \rangle, \langle ldS \rangle, \langle dS \rangle \rangle, \quad (7)$$

де DP — визначений процес;

<> — позначення комбінації того, що містять ці дужки;

S ≈ <eldS>, <ldS>, <dS> — комбінація з експедиційних (eldS), навчально-орієнтованих (ldS) та цифрових (dS) кіберпросторів на S;

MOD — каркас опорних часткових моделей і методів ОЧМ / MODi МАНОК,

$$MOD \approx \langle MODi \rangle, \dots, (MODi \subset S);$$

... — те, що доцільно ідентифікувати / доповнювати до MOD;

<Ŝ> — визначені абстрактні МАНОК-системи;

<S> — визначені практичні реалізації Ŝ на базі визначеної FA;

FĀ — визначені функціональні архітектури Ŝ;

FA — визначені функціональні архітектури S;

→ — позначення ресурсу «...стрілка» (композит DP);

<IBV> — визначені принципи побудови МАНОК-систем (<ІННОВАЦІЙНІСТЬ<sup>1-3</sup>>, <ВИЗНАЧЕНІСТЬ<sup>1-2</sup>>, <УСВІДОМЛЕННЯ<sup>1-2</sup>>);

\* МАНОК — Модель Агрегування Навчально-Орієнтованого [Науково-Освітнього] Контенту

$\langle \mathcal{S}^{<IBV>} \rangle$  — практична реалізація МАНОК-СЛОТ:ІВУ;

$\ell a$  — рівень абстракції  $F\hat{A}$  та функторних  $\hat{S}$ ,  $\ell a < \ell a'$ ;

$\hat{S}^{\ell, \ell a x}$  —  $\hat{S}$  з рівнем абстракції  $\ell$ , яку визначено  $\ell a x$  аксіомами.

Умова  $\langle \mathcal{S}^{<IBV>} \rangle \subseteq \langle \mathcal{S} \rangle$  означає, що будь-яка  $\hat{S}(\mathcal{S})$  побудована на ІВУ-принципах, тобто на базі  $\mathcal{S}^{<IBV>}$ .

У відповідності з АРІП-методом [4, 8],  $\hat{S}^{\ell, \ell a x}$  визначаються аксіоматичним методом шляхом додавання до м.ф.с. (мінімальної формальної системи) — категорія нових аксіом, тобто  $\ell a x = \ell a x + 1$ , або у загальному випадку  $\ell a x < \ell a x'$ . Додавання нових аксіом може викликати зміну м.ф.с., і тоді рівень абстракції  $\hat{S}^{\ell, \ell a x}$  зменшується, а значення  $\ell$  — навпаки збільшується, тобто  $\ell = \ell + 1$ , або у загальному випадку до  $\ell'$ , де  $\ell < \ell'$ .

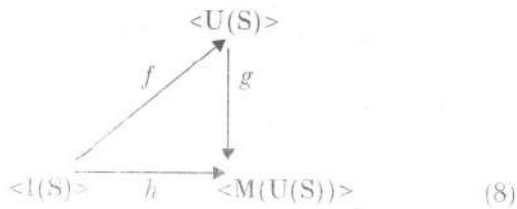
Приклад визначення  $\ell$ ,  $\ell a x$ :

$\hat{S}^{11}$  — це  $\hat{S}$  з  $\ell = 1$  (найвищим рівнем абстракції) та з кількістю аксіом  $\ell a x = 1^*$ , де  $1^* + 1 = 2$ ,  $1^* + 2 = 3$  і т. д., тобто  $1^*$  використовується тільки для «стартової» м.ф.с. = категорія. Іншими словами, для зручності покрокового «відстеження» людиною додавання нових аксіом вважаємо, що для цієї м.ф.с. «стартова» кількість аксіом дорівнює 1;

$\hat{S}^{22}$  — це  $\hat{S}$  з рівнем абстракції 2, що означає використання наступної м.ф.с., та  $\ell a x = 2$  означає, що до аксіом визначення цієї наступної м.ф.с. додано ще одну аксіому.

Наступні приклади дуже важливі для розуміння і побудови формального опису  $\hat{S}^{\ell, \ell a x} / F\hat{A}\ell a$  та їх змістовної інтерпретації в цілому.

Приклад опису лексикографічного ефекту на  $S$  на базі КІ-ДЖЕРАРДА, КІ-ШИРОКОВА та КІ-МАНОК у вигляді діаграм:



де  $I(S)$  — клас елементарних інформаційних одиниць  $[I]$  на  $S$ ;

$U(S)$  — клас елементарних інформаційно-дидактичних одиниць на  $S$ . Згідно з ВРМ-КІ-МАНОКР-семантик,  $U(S)$  є ментальною структурою, схемою [3] та представлена в МАНОК;

$M(U(S))$  — результати цілеспрямованих взаємодій  $\Gamma$  з  $\langle I(S) \rangle$ ,  $\langle U(S) \rangle$ ;

$\Gamma$  — група у визначенні  $dS$  (ц-кіберпростір);  
= група людей /ГН/, програмних агентів /ГА/;

= група ролей ГН/ГА з лексикографічної системи ролей VOC(Гроles);

$f, g, h$  — це DP, що реалізуються  $\Gamma$ , при цьому  $g \circ f = h$ .

Опорні  $U(S)$ , позначені як  $U_0(S)$ , визначаються процедурою  $\pi$  (аналогійним чином і для  $I(S)$ ):

$$\begin{aligned}
 \pi: \langle U_0(S) \rangle &\rightarrow \langle U(S) \rangle, \\
 \langle U_0(S) \rangle &\subseteq \langle U(S) \rangle.
 \end{aligned} \quad (9)$$

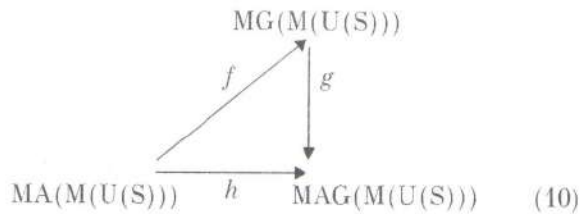
Трійку  $\langle U(S) \rangle, \langle U_0(S) \rangle, \pi$  також отожднюємо з класом ЕІДО та використовуємо це позначення поряд з  $U(S)$ ,  $U_0(S)$  як еквіваленти, вважаючи, що породжувальна процедура  $\pi$  визначена і зрозуміла з контексту. Приклад використання  $\pi$  — підтримка використання еквівалентних багатомовних  $\langle U(S) \rangle$ .

Вербальний опис КІ-ДЖЕРАРДА. Навчальні одиниці потрібно виробляти більш малими [=U(S), ціль] і комбінувати їх [=МА(M(U(S))), MG(M(U(S))), MAG(M(U(S)))] у велике різноманіття специфічних навчальних програм [=M(U(S))], пристосованих [=ціль] до кожного учня [=Г] [8].

Формальний опис КІ-ДЖЕРАРДА з використанням ОЧМ МАНОК <MODi-агрегування>:

<Конструктор> = <Агрегатор> [=MAG(M(U(S)))],  
<Генератор> [=MG(M(U(S)))], <Аналізатор> [=МА(M(U(S)))],

та комутативних діаграм:



Приклад інтерпретації компонентів  $\Gamma, U(S), M(U(S)), \langle MA(M(U(S))) \rangle, \langle MG(M(U(S))) \rangle, \langle MAG(M(U(S))) \rangle$ . Автори відомих дидактичних теорій С. М. Reigeluth та L. M. Nelson описують та розглядають такий типовий навчальний контекст (ситуацію): «Коли вчителі [=Г] *уперше* отримують навчальні матеріали [=M(U(S))], то вони часто розбивають їх на складові частини [=MA(M(U(S))) / MG(M(U(S)))] та у подальшому складають різними способами [=MA(M(U(S))), MG(M(U(S)))]», щоб підтримати свої індивідуальні навчальні цілі [=MAG(M(U(S)))]». Зазначене підказує одну з причин того, що саме орієнтація на багаторазове використання навчальних компонентів може бути вигідною, корисною з дидактичної точки зору ([=...] — Авт., див. також у [8]).

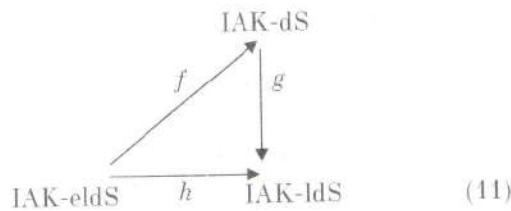
Приклад зовнішніх властивостей /суттєвих характеристик  $\hat{S}^{\ell, \ell a x}$  — ІАК-діаграми. За визначенням [4]:

**ІАК.** Інноваційне агрегування об'єктів навчально-орієнтованого контенту, яке доступне у формі навчального об'єкта.

**МАНОК-МАЙСТЕРНЯ<sup>1</sup>,** вербальний опис МАНОК-системи. Система, що за допомогою МАНОК-СЛОТ:ІВУ (тобто ІВУ-принципів) підтримує динамічне створення нового е-знання на S у формі ІАК.

**МАНОК-МАЙСТЕРНЯ<sup>2</sup>,** «найвнє» визначення-аналогія МАНОК-систем. «Величезне, все зростаюче багатство знань розкидано сьогодні по всьому світу. Цих знань, ймовірно, було б достатньо для вирішення всієї величезної кількості труднощів наших днів — але вони розсіяні й неорганізовані. Нам необхідне очищення мислення в своєрідній майстерні, де можна одержувати, сортувати, підсумовувати, засвоювати, роз'яснювати і порівнювати знання та ідеї» (Герберт Уелс, 1940).

У відповідності з принципом ІННОВАЦІЙНОСТІ<sup>2</sup> [= Основний критерій оцінювання МАНОК-систем — ступінь використання ІАК на S за допомогою МАНОК-систем], для розв'язування задачі (1)–(7) ключовим поняттям / суттєвою характеристикою МАНОК-систем є ІАК-діаграми:



Вони повинні бути комутативними, тобто  $g \circ f = h$  для будь-яких ІАК з  $\langle \text{eldS} \rangle$ ,  $\langle \text{ldS} \rangle$ ,  $\langle \text{dS} \rangle$  і для будь-якої  $\hat{S}^{\ell, \text{tax}}$ .

ІАК-діаграми типу (11) визначено згідно з принципами ІННОВАЦІЙНОСТІ<sup>1-3</sup> та принципами визначення  $S \approx \langle \text{eldS} \rangle$ ,  $\langle \text{ldS} \rangle$ ,  $\langle \text{dS} \rangle$ . Вони відображають різноманітні властивості зовнішньої поведінки  $\hat{S}^{\ell, \text{tax}}$  і саме вони використовуються для визначення  $\hat{S}^{\text{II}}$  (родове поняття). Для формального опису  $\hat{S}^{\ell, \text{tax}}$  також використовуються внутрішні властивості, такі як MOD<sub>i</sub>. Зазначимо, що у відповідності з принципом двійковості можна водночас змінити напрямки усіх стрілок у діаграмах (11). Наприклад, це означає, що коли ідентифікований ІАК «заходить» в eldS, то його треба представити у композитах MOD<sub>i</sub> та в подальшому подати в  $\langle \text{ldS} \rangle$  /  $\langle \text{dS} \rangle$ .

*Приклад внутрішніх властивостей / суттєвих характеристик  $\hat{S}^{\ell, \text{tax}}$ :*

U(S) — суперклас елементарних інформаційно-дидактичних одиниць (ЕІДО) на S. Класи U(S) або їх члени позначаються як u(S) або просто u;

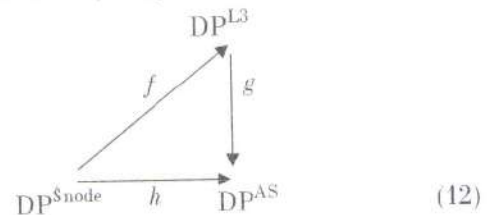
MOD, MOD<sub>i</sub>, mod<sub>i</sub> — суперкласи, класи або члени класів МАНОК;

f, g, h — цими латинськими літерами позначають композити загального DP<sup>S</sup>, які звичайно називаються  $\hat{S}^{\ell, \text{tax}}$ -стрілками, а композити типу U(S), MOD — звичайно називаються  $\hat{S}^{\ell, \text{tax}}$ -об'єктами та позначаються латинськими літерами a, b, c, d.

Багато об'єктів МАНОК уже ідентифіковано та описано, зокрема, на базі відповідних дидактичних та лексикографічних теорій, але в цілому клас U(S) поки що залишається як «недоступна система» ЕІДО. Зазначимо, що у відповідності з КІ-ДЖЕРАРДА та КІ-ШИРОКОВА, це «відносно стала система зі скінченним набором ЕІО, ЕІДО».

Отже, необхідно формально визначити в МАНОК (за допомогою МАНОК-систем) кінцевий скінченний набір комбінацій  $\langle U(S) \rangle$  [представлених в MOD, ...,  $\langle \text{mod}_i \rangle$ ], з якого за кінцевим скінченним набором дидактично обґрунтованих правил можна отримувати будь-які персоналізовані  $\langle M(U(S)) \rangle$ . Використання останніх дає можливість задовольняти персоналізовані потреби або вимірювані навчальні цілі кожного Учня (роль). Іншими словами, необхідно формально описати проблему: як краще визначити  $\langle U(S) \rangle$  та MOD як початковий та кінцевий  $\hat{S}^{\ell, \text{tax}}$ -об'єкти? (Або навпаки — визначити  $\langle U(S) \rangle$  як кінцевий  $\hat{S}^{\ell, \text{tax}}$ -об'єкт, а ... — що є одне і те саме за принципом двоїстості.)

*Приклад зовнішніх властивостей / суттєвих характеристик FĀla.* Для розв'язування задачі (1)–(7) ключовим поняттям та суттєвою характеристикою МАНОК-систем є ІАК-діаграми (11). Але у відповідності з принципом ІННОВАЦІЙНОСТІ<sup>1</sup> [= девіз і головний принцип побудови МАНОК-систем, динамічне створення нового е-знання на S у формі ІАК за допомогою МАНОК-систем, загальним кінцевим результатом використання яких будуть люди з високоякісними L3-компетенціями], для FĀla використовуються DP-ІАК-діаграми (DP має композит ІАР) виду:



Вони повинні бути комутативними, тобто  $g \circ f = h$  для будь-яких ІАК з  $\langle \text{eldS} \rangle$ ,  $\langle \text{ldS} \rangle$ ,  $\langle \text{dS} \rangle$  і для будь-яких  $\hat{S}^{\ell, \text{tax}}$  / FĀla, де:

DP<sup>Snode</sup> — це DP «ІАК-вузол» у межах застосування FĀla, виходом практичної реалізації якого є створені ІАК;

DP<sup>AS</sup> — це DP «Авторські системи» (наприклад, відомі як CMS, LCMS, LMS, MLE, NLN) для

побудови інноваційних ІТНО на базі багаторазового використання створених ІАК;

$DP^{L3}$  — це  $DP$ , визначений на континуумі безперервного навчання  $L3 = LLL$  [9], який забезпечує підтримку багаторазового використання створених ІАК.

*Приклад опису узагальнення суттєвих характеристик  $DP^{\hat{S}_{FA}}$ .*

По-перше, опис переходу, наприклад від  $\hat{S}^{t, tax}$  до  $\hat{F}\hat{A}la$ , здійснюється у межах відображення категорій  $\hat{S}$  у категорії  $\hat{F}\hat{A}$  зі збереженням категорної структури, що потребує введення та застосування нового поняття — функтор. Введення функторів (як стрілок) між категоріями означає «підняття» на новий рівень абстракції. З технічних міркувань, щоб спростити та не переобтяжувати опис розв'язування задачі (1-7), в описах  $DP^{\hat{S}_{FA}}$  та інших релевантних описах цей показник не відображається. Оскільки в цих описах необхідно «підняття» ще на один рівень абстракції, слід розглядати функтори як об'єкти. Крім цього, деякі ОЧМ МАНОК (MODi-агрегування: <формалізм>, <конструктор> = <агрегатор>, <генератор>, <аналізатор>) описуються також із застосуванням апарату категорій і є важливими композитами опису  $DP^{\hat{S}_{FA}}$  в цілому.

По-друге, опис  $DP^{\hat{S}_{FA}}$  зупиняємо (відкладаємо), якщо:

- досягнуто хоча б одну  $F\hat{A}la''$  (5), на базі якої можна реально проводити деталізовані інженерні розробки МАНОК-систем;
- моделювання  $S$  на базі МАНОК надало можливість реально оволодіти роллю та функціями МАНОК-систем у цілому.

По-третє, інтегральне застосування лексикографічних і дидактичних теорій та апарату категорій для побудови МАНОК-систем дає можливість визначити  $DP^{\hat{S}_{FA}}$  та їх композити за допомогою суттєвих універсальних характеристик / властивостей ресурсів [8], які визначають їх роль у відношенні до інших ресурсів та визначають кращу поведінку, призначення  $DP^{\hat{S}_{FA}}$ . Контексти  $DP^{\hat{S}_{FA}}$  змінюються на  $S$  у світлі нових знань. Якщо відповідні форми буде потрібно адаптувати до нових контекстів, то початком є перегляд «старих» концептуальних ідей побудови МАНОК-систем у цьому світлі.

### 3. Розв'язування задачі $Z^{\hat{S}_{FA}}$

Відповідно до принципу ВИЗНАЧЕНОСТІ<sup>1</sup> [=Постійне поліпшення відповідності вербальних і формальних описів МАНОК() на базі АРПІ-методу] основним методом розв'язування задачі  $Z^{\hat{S}_{FA}}$  є АРПІ-метод [4].

АРПІ-метод (<Абстракція — Реалізація (Абстракції) Ідей / Понять >) застосовується у формі  $DP$ , одним з кроків якого є МАНОК()-абстракція.

*Крок МАНОК()-абстракція.* Ключові поняття загальної постановки МАНОК()-задач вводяться за допомогою формалізації, виходячи з вербального опису ключових ідей / понять з використанням мінімальної формальної структури (м.ф.с.) — МАНОК()-базису. У подальшому до цього базису покроково додаються / уточнюються релевантні ідеї / поняття однієї або більше теорій. *Примітка.* Ключове питання / проблема: «Як краще визначити м.ф.с. на вищому рівні абстракції?». Незважаючи на те, що вищого рівня абстракції МАНОК-система вже формально визначена [8], загальна рекомендація — комбіновано використовувати (на базі МАНОК-СЛОТ:ІВУ, див. там само МАНОК-ЗАДАЧИ<sup>1-5</sup>): методи лексикографічних теорій; метод аналогій для ідентифікації релевантних [наявних / прогнозованих] фактів, ідей, абстрактних понять, ілюстрацій, прикладів (у т. ч. їх спеціалізації та суттєві характеристики універсального характеру, такі як «форма-зміст»); аксіоматичний метод.

Далі описано результати застосування АРПІ-методу для розв'язування задачі  $Z^{\hat{S}_{FA}}$ . (Формальне визначення МАНОК-системи вважається справжнім.)

**Аксіоматичне визначення  $\hat{S}^{11}$ .** Позначимо  $a =$  ІАК-eldS,  $b =$  ІАК-dS,  $c =$  ІАК-ldS,  $f: a \rightarrow b$ ,  $g: b \rightarrow c$ ,  $g \circ f: a \rightarrow c$ , див. діаграму (11). Ця  $\hat{S}$  за визначенням містить у собі:

- 1) сукупність ресурсів, що називаються  $\hat{S}$ -об'єктами;
- 2) сукупність ресурсів, що називаються  $\hat{S}$ -стрілками;
- 3) операції (ресурси), що ставлять у відповідність кожній  $\hat{S}$ -стрілці  $f$   $\hat{S}$ -об'єкт  $input f$  (початок стрілки, вхідний елемент) і  $\hat{S}$ -об'єкт  $output f$  (кінець стрілки, вихідний елемент, у т. ч. ціль). Якщо  $a = input f$ ,  $b = output f$ , то еквівалентним є запис:

$$f: a \rightarrow b, \text{ або } a \xrightarrow{f} b;$$

- 4) операцію, що ставить у відповідність кожній парі  $(g, f)$   $\hat{S}$ -стрілок з  $input g = output f$   $\hat{S}$ -стрілку  $gf$  (або тотожний запис  $g \circ f$ ), композицію  $f$  і  $g$ , з  $input (gf) = input f$  і  $output (g \circ f) = output g$ , тобто  $g \circ f: input f \rightarrow output g$ , причому для кожних наступних  $\hat{S}^{11}$ -об'єктів та  $\hat{S}^{11}$ -стрілок  $a \xrightarrow{f} b \xrightarrow{g} c \xrightarrow{h} d$  виконується аксіома асоціативності:  $h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$ ;

- 5) аксіому тотожності. Для будь-яких  $\hat{S}$ -стрілок  $f: a \rightarrow b$  і  $g: b \rightarrow c$  справедливо  $I_b \circ f = f$  і  $g \circ I_b = g$ , де  $I_b$  — одинична стрілка, тобто для кожного  $\hat{S}$ -об'єкта  $b$  та  $\hat{S}$ -стрілки  $I_b$  справедливо  $I_b: b \rightarrow b$ .

*Приклад інтерпретації визначення  $\hat{S}^{11}$ :*

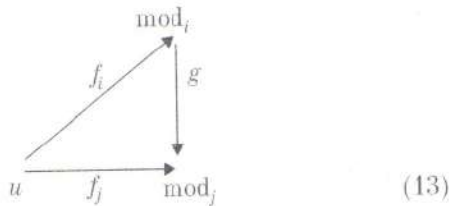
- термін ресурс використовується у значенні RDF-ресурсу, тобто ресурс — це все те, що може бути ідентифіковано;
- у відповідності з принципом двоїстості у діаграмі (11) напрями всіх стрілок можна одночасно поміняти на протилежні;

- IAK-dS у певному стані не зв'язано з IAK-eldS, тобто породжується тільки в dS. Наприклад, у глобальній Learning Objects Network ([www.learningobjectsnetwork.com](http://www.learningobjectsnetwork.com)). Отже, на eldS (в  $\hat{S}$ ) повинні відстежуватися, акумулюватися й т. ін. усі IAK-dS / IAK-ldS;
- будь-який IAK-eldS повинен мати відповідну модель у MOD.

*Визначення.* Mod-діаграмою в  $\hat{S}$  називається сукупність об'єктів  $\text{mod}_i, \text{mod}_j$ , спільно з деякими  $\hat{S}$ -стрілками  $g: \text{mod}_i \rightarrow \text{mod}_j$  між деякими об'єктами з цієї діаграми. Звернімо увагу, що кількість стрілок між об'єктами не обов'язково є визначеною.

*Приклад інтерпретації поняття.* Нехай  $\text{mod}_i$  та  $\text{mod}_j$  — це члени наборів ОЧМ МАНОК. Деякий новий «потенційний» член набору спочатку ідентифікується й за принципом часткового розуміння [4] відноситься до класу більш високого рівня. У подальшому він крок за кроком уточнюється або взагалі відкидається як відомий об'єкт (це означає, що стрілок  $\text{mod}_i \rightarrow \text{mod}_j$  взагалі немає). Для формального опису подібних взаємозв'язків-трансформацій використовується композит — mod-діаграма в  $\hat{S}$ .

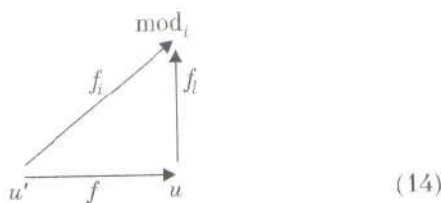
*Визначення.* <MOD>-діаграмою для mod-діаграми в  $\hat{S}$  називається такий  $\hat{S}$ -об'єкт  $u$  спільно із  $\hat{S}$ -стрілками  $f: u \rightarrow \text{mod}_i$  для кожного об'єкта  $\text{mod}_i$  з mod-діаграми в  $\hat{S}$ , що діаграма



є комутативною для будь-якої стрілки  $g$  з mod-діаграми, тобто  $g \circ f_i = f_j$ .

*Приклад інтерпретації поняття.* У (13) об'єкт  $u$  інтерпретується як член  $\langle U(S) \rangle$ , а  $\text{mod}_i$  та  $\text{mod}_j$  — це члени наборів ОЧМ МАНОК, які потрібно визначити повно.

*Визначення межі <MOD>-діаграми.* Межею mod-діаграми називається <MOD>-діаграма  $\{f_i: u \rightarrow \text{mod}_i\}$  така, що для будь-якої іншої <MOD>-діаграми  $\{f'_i: u' \rightarrow \text{mod}_i\}$  існує лише тільки одна стрілка  $f: u' \rightarrow u$ , для якої діаграма



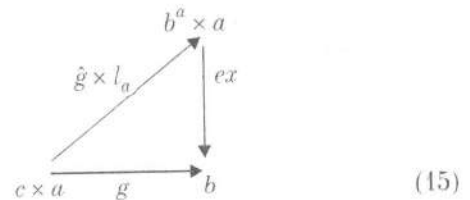
комутативна на кожному об'єкті  $\text{mod}_i$  з mod-діаграми.

Ця <MOD>-діаграма є універсальною відносно всіх своїх <MOD>-діаграм, як видно з останньої діаграми. Або, іншими словами, <MOD>-діаграма має універсальну властивість / характеристику, і для всіх <MOD>-діаграм існує тільки одна <MOD>-діаграма.

*Приклад інтерпретації поняття.* У (14) об'єкт  $u$  інтерпретується як ідентифікований член  $\langle U(S) \rangle$  для класу  $\text{mod}_i$  ОЧМ МАНОК та будь-який інший  $u'$  з  $\langle U(S) \rangle$  для цього класу є еквівалентним (як завжди, з точністю до ізоморфізму). Або, іншими словами, клас  $(\text{mod}_i)$  ОЧМ МАНОК визначено повно відносно  $\langle U(S) \rangle$ .

*Визначення скінченно повної  $\hat{S}$ .*  $\hat{S}$  називається скінченно повною, якщо вона містить межу будь-якої своєї скінченної діаграми. Скінченна діаграма містить скінченну кількість об'єктів та стрілок між ними.

*Визначення експоненціювання  $\hat{S}$ .*  $\hat{S}$  допускає експоненціювання, якщо в ній існує добуток будь-яких двох об'єктів та якщо для будь-яких двох об'єктів  $a$  і  $b$  існує  $\hat{S}$ -об'єкт  $b^a$ , який називається експоненціалом, та  $\hat{S}$ -стрілка  $ex: b^a \times a \rightarrow b$ , яка називається стрілкою значення, такі, що для будь-яких  $\hat{S}$ -об'єкта  $c$  та  $\hat{S}$ -стрілки  $g: c \times a \rightarrow b$  існує єдина  $\hat{S}$ -стрілка  $\hat{g}: a \rightarrow b^a$ , для якої діаграма



є комутативною, тобто  $ex \circ (\hat{g} \times l_a) = g$ , де символом  $\times$  позначено декартів добуток.

*Визначення (декартово) замкненої  $\hat{S}$ .* (Декартово) замкненою  $\hat{S}$  називається скінченно повна  $\hat{S}$ , яка допускає експоненціювання.

*Аксіоматичне визначення  $\hat{S}^{12}, \hat{S}^{12}$ .* — це (декартово) замкнена  $\hat{S}^{11}$ .

*Приклад інтерпретації поняття.*  $\langle U(S) \rangle (=a)$ , у відповідності з КІ-ДЖЕРАРДА та КІ-ШИРОКОВА, є «відносно сталою системою зі скінченим набором ЕЮ, ЕІДО» — див. (6)–(7). Див. також про фрактал «Нові навчальні об'єкти на Вебі» в [8]. Нехай  $\langle U(S) \rangle$  має  $m$  ЕІДО, а  $\langle \text{MOD} (=b) \rangle$  має  $n$  ОЧМ, тоді  $\langle \text{MOD}^{\langle U(S) \rangle} \rangle$  має  $n^m$  елементів. Отже, суть визначення  $\hat{S}^{12}$  полягає у тому, щоб у термінах стрілок охарактеризувати всі DP з вхідними елементами з  $\langle U(S) \rangle$  та вихідними елементами (значеннями) в  $\langle \text{MOD} \rangle$  з використанням спеціальної стрілки  $ex$  (правило).

Наступним кроком є визначення  $\hat{S}^{21}$ . Для цього необхідно використати такі визначення — *підоб'єкт*

$\hat{S}$  (категорійний аналог поняття підмножина) та класифікатор підоб'єктів  $\hat{S}$ .

Визначення класифікатора підоб'єктів  $\hat{S}$ . Класифікатором підоб'єктів  $\hat{S}$  називається  $\hat{S}$ -об'єкт  $\Omega$  спільно зі  $\hat{S}$ -стрілкою  $\text{true}: 1 \rightarrow \Omega$ , такий що виконується  $\Omega$ -аксіома, де знаком 1 позначено кінцевий об'єкт  $\hat{S}$ .

$\Omega$ -аксіома. Для кожної монострілки  $f: a \rightarrow b$  існує лише одна  $\hat{S}$ -стрілка  $\chi_f: a \rightarrow \Omega$ , для якої діаграма

$$\begin{array}{ccc}
 a & \xrightarrow{f} & b \\
 \downarrow ! & & \downarrow \chi_f \\
 1 & \xrightarrow{\text{true}} & \Omega
 \end{array} \quad (16)$$

є декартовим квадратом; ! — це єдина стрілка, а стрілка  $\chi_f$  називається характеристичною стрілкою (аналог характеристичної функції на множині) монострілки  $f$ .

Класифікатор підоб'єктів, якщо він існує, є єдиним з точністю до ізоморфізму.

Аксиоматичне визначення  $\hat{S}^{21}$ .  $\hat{S}^{21}$  — це  $\hat{S}^{12}$ , яка має класифікатор підоб'єктів.

Для визначення  $\hat{S}^{22}$  використовуються: аксіоматична система CL (класична логіка CL, що має єдине правило виведення);  $\Omega$ -аксіома; поняття  $d$ -гратки (аналог частково упорядкованої множини з  $\text{inf}$  та  $\text{sup}$ , але для стрілок  $f$  і  $g$ ).

Аксиоматичне визначення  $\hat{S}^{22}$ .  $\hat{S}^{22}$  — це така  $\hat{S}^{21}$ , що для кожного  $\hat{S}^{21}$ -об'єкта  $d$ -гратки є булевою алгеброю.

Отже, у DP ( $\text{DP}^{\hat{S}, \text{FA}}$ ) формально введено правила виведення — див. визначення з Інформаційно-дидактичного базису МАНОК [5]. Зазначимо, що у відповідності з АРП-методом, подальша спеціалізація / деталізація аксіоматичного визначення  $\hat{S}$  виконується на базі відповідних теорій логіки. Реально оцінювати справжню відповідність, на наш погляд, можна тільки на базі усвідомлення найкращої практики деталізованих інженерних розробок МАНОК-систем.

#### 4. Приклади практичного застосування

За останні п'ять років за участю та під керівництвом автора на базі МАНОК створено та впроваджені

но понад 50 інноваційних програмно-інформаційних ІТНО-продуктів, оформлено 15 авторських свідоцтв України [2]. У праці [8] описано високого рівня реалізаційну функціональну архітектуру МАНОК-систем, на базі якої розробляється демонстратор МАНОК-Системи Лексикографічно-Освітнього Типу «ІВУ-принципи» (розробник програмного коду МАНОК-СЛОТ:ІВУv1.0 — К. М. Якименко) [4]. Довгострокова мета побудови МАНОК-СЛОТ:ІВУ — забезпечення постійної підтримки найкращої практики застосування ІВУ-принципів МАНОК-спільнотою.

В Українському мовно-інформаційному фонді НАН України розгорнуто роботи з розроблення МАНОК-СЛОТ: «Лексикограф Національної словникової бази [1]».

**Список літератури:** 1. Широков В. А. Елементи лексикографії. — К.: Довіра, 2005. — 301 с. 2. Манако А. Ф. Підхід до моделювання цілеспрямованого розвитку інноваційних інформаційних технологій «навчальні об'єкти» // Проблеми програмування. Спеціальний випуск «Матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. з програмування УкрПРОГ'2006». — 2006. — № 2-3. — С. 475-481. 3. Манако А. Ф. Сетевое общество и учебно-ориентированные технологии для всех // Управляющие системы и машины. — 2004. — № 4. — С. 123-130. 4. Манако А. Ф. Принципы построения МАНОК-систем // Управляющие системы и машины. — 2007. — № 1. 5. Манако А. Ф. Информационно-дидактический базис МАНОК/S // Управляющие системы и машины. — 2005. — № 3. — С. 63-70. 6. Манако А. Ф. Модели агрегирования объектов навчального контенту на базі систем інформаційних і навчальних технологій // Проблеми програмування. Спеціальний випуск «Труди IV Міжнар. наук.-практ. конф. з програмування «УкрПРОГ'2004». — 2004. — № 2-3. — С. 587-594. 7. Манако А. Ф. Модели агрегирования понятиевых объектов непрерывного навчания за підтримкою інформаційних і телекомунікаційних технологій // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2005. — № 3. — С. 29-37. 8. Манако А. Ф. Системные аспекты моделирования целенаправленного развития инновационных информационных технологий «учебные объекты» // УСИМ. — 2006. — № 6. — С. 10-19. 9. A memorandum on life-long learning. Commission staff working paper. — Brussels, SEC, 1832, 2000. — P. 36.

Надійшла до редколегії 29.11.2006

УДК 615.47

Е. О. Шамраева, О. Г. Аврунин

## ВЫБОР МЕТОДА СЕГМЕНТАЦИИ КОСТНЫХ СТРУКТУР НА ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

### 1. Введение

На современном этапе разработка медицинских компьютерных систем для диагностики и операционного планирования невозможна без применения теории искусственного интеллекта, методов распознавания образов и систем поддержки принятия решений, позволяющих существенно повысить степень автоматизации выполняемых задач.

Одной из наиболее часто встречаемых патологий в нейрохирургической практике являются черепно-мозговые травмы, приводящие к органическим и функциональным нарушениям центральной нервной системы. При этом в результате тяжелых черепно-мозговых травм образуются обширные костные дефекты, требующие хирургической коррекции [1, 2]. Непосредственно перед выполнением оперативного вмешательства проводится этап нейрохирургического планирования операции, в результате которого определяются возможности хирургического доступа, а также осуществляется выбор способа пластики костного дефекта и материала имплантата с учетом косметических аспектов. На современном уровне развития диагностической и хирургической аппаратуры для повышения эффективности реконструктивных хирургических вмешательств целесообразно выполнять процедуры нейрохирургического планирования с максимальной степенью автоматизации. При этом одной из наиболее сложных задач является автоматизированное выделение костных структур на интроскопических изображениях головы [3–6], решение которой основывается на применении методов распознавания образов, классификации объектов и поддержки принятия решений. От точности результатов данной процедуры зависит, в конечном счете, степень точности всего этапа нейрохирургического планирования. В связи с этим актуальными являются вопросы разработки эффективных методов сегментации интроскопических изображений.

### 2. Постановка задачи

Исходными данными для проведения нейрохирургического планирования являются результаты рентгеновского компьютерного томографического (КТ) обследования головы пациента, представленные в виде набора из  $N$  изображений томографических срезов, выполненных с шагом 1 мм параллельно физиологической горизонтали — орбито-меатальной плоскости черепа при стандартной укладке пациента.

Изображение томографического среза представляет собой распределение относительных коэффициентов линейного поглощения в заданной плоскости сечения и задается в виде двумерной дискретной функции интенсивности  $F(i, j)$ , заданной на растре размером  $I \times J$  ( $512 \times 512$ ) элементов и принимающей 256 уровней  $F_n(i, j) \in [0... 255]$ . Задача сегментации костных структур на изображениях томографических срезов в общем случае сводится к построению бинарной характеристической функции:

$$H_n(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{при } (i, j) \in D_K; \\ 0, & \text{при } (i, j) \notin D_K; \end{cases} \quad (1)$$

где  $D_K$  — область изображения, соответствующая костным структурам.

Корректное определение областей  $D_K$  при наличии артефактов и помех на изображениях томографических срезов является целью данной работы.

### 3. Анализ методов сегментации костных структур на томографических изображениях

Основной причиной сравнительно низкого уровня автоматизации программных продуктов для анализа медицинских изображений является высокая вариабельность большинства анатомических структур. Поэтому совершенствование существующих и разработка новых методов и подходов для анализа (в первую очередь — для сегментации) интроскопических изображений должны быть основаны на изучении специфики визуализации исследуемых объектов. В настоящее время базовые подходы к сегментации изображений достаточно хорошо освещены в литературе [6–8]. При этом можно определить пять основных классов методов сегментации объектов: пороговые, наращивания областей, выделения границ, корреляционные и текстурные. Последние два находят лишь ограниченное применение при анализе изображений биологических объектов ввиду высокой индивидуальной изменчивости их геометрических и оптических свойств, а так же характеристик окружающих структур. Для эффективной работы методов наращивания областей необходимо наличие устойчивой связности внутри отдельных областей изображения и интерактивный ввод априорной информации. Непосредственное применение методов выделения границ по градиентным изображениям исследуемой области ограничивается трудностью выбора пороговых значений для градиентов интенсивности и сложностью постобработки в случае получения разрывных контуров. Пороговые

методы применяются для контрастных изображений при наличии стабильных различий интенсивности в отдельных областях.

На томографических изображениях костные структуры, являющиеся наиболее плотными анатомическими образованиями, представляются в виде высокоинтенсивных протяженных объектов на достаточно однородном фоне (при отсутствии артефактов), соответствующем внутримозговому веществу. Поэтому для выделения областей изображения, соответствующих костным структурам, целесообразно использовать пороговый метод с автоматическим выбором порогового значения с помощью анализа гистограммы интенсивности. В литературе также рассматривается широкий спектр методов и алгоритмов предварительной обработки изображений — точечных и локальных операций, включающих коррекцию яркости и контраста, а также фильтрацию исходных данных. Однако в большинстве источников эти операции рассматриваются изолированно по отношению к последующим процедурам обработки изображений более высокого уровня [9]. При этом недостаточно освещаются вопросы согласованности методов сегментации и предварительного преобразования изображений.

#### 4. Основные этапы алгоритма выделения областей костных структур на томографических изображениях

При разработке алгоритмов сегментации основной задачей является определение оптимальной последовательности преобразований исходного полутонового изображения в бинарное с корректно обозначенными областями объектов и фона. При этом оптимальным в контексте данной задачи является алгоритм, обладающий минимальной погрешностью сегментации костных объектов. Характеристики для определения точности алгоритма сегментации будут рассмотрены ниже. Остальные параметры, такие как быстродействие, объем используемой памяти, слож-

ность организации отдельных вычислительных блоков, при реализации на современных аппаратно-программных платформах являются не существенными. В предлагаемой работе рассматривается комплексный подход к решению задачи выделения костных структур на томографических изображениях, основанный на согласовании методов предварительной обработки изображений, сегментации и последующей коррекции сегментированных данных.

Учитывая, что разработанный алгоритм имеет непосредственную практическую реализацию в виде структурной единицы программного продукта для планирования нейрохирургических реконструктивных вмешательств, представляется удобным рассмотреть его основные этапы на примере структуры соответствующего программного модуля (рис. 1).

Данный модуль состоит из блоков предварительной обработки изображения, формирования сегментированного изображения и постобработки сегментированного (результатирующего) изображения. Исходными данными для работы модуля сегментации являются полутоновые восьмибитовые изображения  $F_n(i, j)$  томографических срезов размером  $512 \times 512$  элементов. На рис. 2, а изображен аксиальный КТ-срез головы человека с костным дефектом фронтально-орбитальной области.

Блок предварительной обработки изображения должен обеспечивать устойчивость процедуры сегментации к действию импульсных и высокочастотных помех и реализуется на основе алгоритма медианной фильтрации, который осуществляется посредством движения квадратной апертуры  $(2p+1) \times (2p+1)$  по изображению томографического среза  $F(i, j)$ ,  $i, j \in [0 \dots 511]$ , и замены значения интенсивности элемента изображения в центре апертуры медианой исходных значений интенсивностей остальных элементов апертуры:

$$F(i, j) = \text{median}(F(i+l, j+k)) \text{ при } l, k \in [-p, p], \quad (2)$$

где  $F(i, j)$  — значение на выходе медианного фильтра.

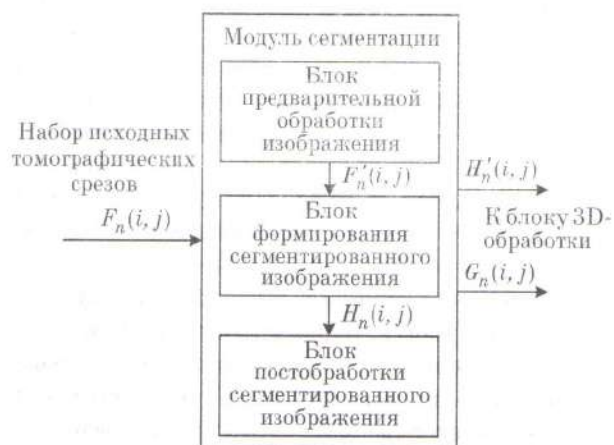


Рис. 1. Структурная схема алгоритма выделения костных структур на томографических изображениях

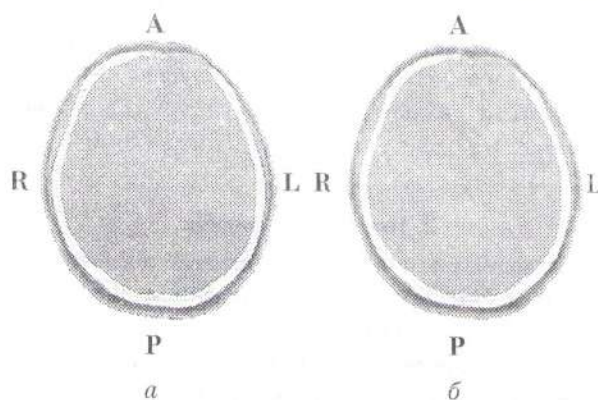


Рис. 2. Изображения аксиальных томографических срезов головы человека: а — исходное изображение; б — изображение, полученное в результате обработки медианным фильтром с параметром апертуры  $p = 2$

Медианой, упорядоченной по возрастанию или убыванию последовательности выборочных значений, является центральный по положению элемент данной последовательности. Исходя из этого, вычисление медианы производилось с помощью преобразования матрицы значений интенсивности элементов изображения, попавших в апертуру (2), в вектор  $V[V(1), V(2), \dots, V((2p+1)^2 - 1)]$ , содержащий  $(2p+1)^2$  элементов, согласно выражению

$$F(i+l, j+k) \Rightarrow V(m=(l+p)(2p+1)+(k+p)),$$

при  $l, k \in [-p, p]$ ,  $m \in [0, (2p+1)^2 - 1]$ , (3)

а также сортировки элементов вектора  $V(m)$  по возрастанию  $V[V(1) \leq V(2) \leq \dots \leq V((2p+1)^2 - 1)]$  и нахождения центрального по положению элемента  $V(m)$  данной последовательности с индексом  $m = ((2p+1)^2 + 1) / 2$ . Данный алгоритм позволяет полностью устранить локально расположенные помехи на изображении, не превосходящие по площади  $S_{\Pi}$  половины площади  $S_{\Phi} = (2p+1)^2$  апертуры фильтра:  $S_{\Pi} < \frac{1}{2} S_{\Phi}$ . Такими помехами, как правило, являются изображения небольших костных фрагментов и артефакты от структур с высокой плотностью, например, внешних рентген-контрастных меток, определяющих базовую плоскость сканирования. Для уменьшения эффекта размытия границ костных структур алгоритм реализовывался рекурсивно, путем записи результирующих данных в отдельный буфер. Наилучшие результаты работы алгоритма при обработке изображений данного типа достигаются при выборе апертуры фильтра с параметром апертуры  $p=2$ . Изображение, полученное после обработки данным медианным фильтром, представлено на рис. 2, б. С помощью проведенной процедуры удалены мелкие костные фрагменты в зоне костного дефекта, присутствующие на исходном изображении (рис. 2, а).

В соответствии с выражением (1), построение бинарной характеристической функции для выделения костных структур пороговым методом выполняется согласно формуле:

$$H_n(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{при } F'(i, j) \geq T; \\ 0, & \text{при } F'(i, j) < T. \end{cases} \quad (4)$$

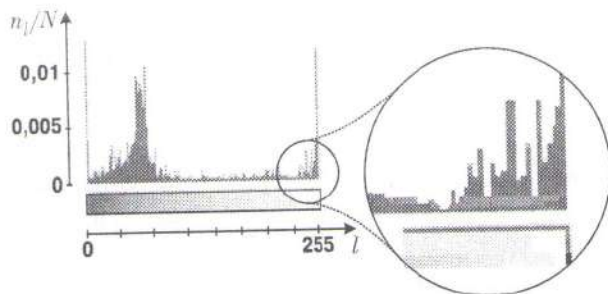


Рис. 3. Гистограмма интенсивности исходного изображения, представленного на рис. 2, а

Определение порогового значения проводилось с помощью анализа гистограммы изображения, представляющей собой характеристику распределения уровней интенсивностей

$$S(l) = \frac{n_l}{I \cdot J}, \quad l \in [0 \dots 255], \quad (5)$$

показывающую, какое число  $n_l$  элементов изображения из общего количества элементов  $I \times J$  имеет заданную интенсивность  $l$ .

Гистограмма изображения КТ-среза, определяемая по формуле (5), как правило, имеет сложный многомодовый характер (рис. 3).

Для облегчения анализа путем устранения несущественных выбросов целесообразно выполнить линейное сглаживание гистограммы методом скользящего среднего согласно формуле:

$$\bar{S}(l) = \frac{1}{K+1} \sum_{m=-K}^K S(l+m), \quad 1+K \leq l \leq 255-K, \quad (6)$$

где  $S(l)$  — значения гистограммы, соответствующие  $l$ -му уровню яркости,  $\bar{S}(l)$  — усредненные значения;  $K$  — параметр усреднения по окрестности точки с индексом  $l$ .

Эффективность процедуры сглаживания, выполняемой по формуле (6), для типичных распределений интенсивностей на изображениях КТ-срезов, приводящая к устранению незначительных по амплитуде локальных экстремумов, проявлялась при значениях  $K \geq 9$  (рис. 4).

Учитывая, что изображения КТ-срезов имеют стабильную характеристику фона, а также априорную информацию о том, что костным структурам соответствуют области с максимальной интенсивностью, можно определить значение глобального порога  $T$  для сегментации путем анализа экстремумов на усредненной гистограмме изображения [10, 11]. Для этого определяется глобальный (в области высоких интенсивностей) максимум  $M_0$ , а также  $k$  локальных максимумов  $M_k$  гистограммы. Затем для каждого локального максимума гистограммы производится расчет коэффициентов  $\alpha_k$ :

$$\alpha_k = \frac{M_k}{m_k + 1}, \quad (7)$$

где  $M_k$  — значение  $k$ -го локального максимума;  $m_k$  — значение локального минимума в диапазоне

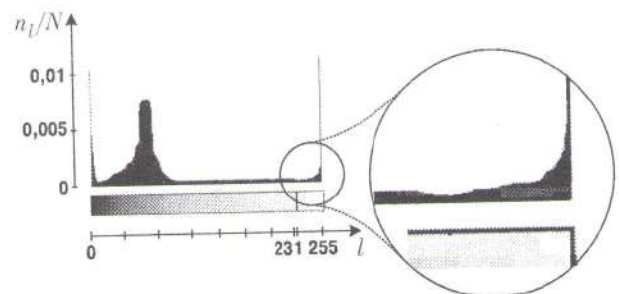


Рис. 4. Сглаженная гистограмма интенсивности

между глобальным максимумом и рассматриваемым локальным.

Тот из локальных максимумов, для которого значение  $\alpha_k$  окажется наибольшим, выбирается в качестве второго основного максимума гистограммы. При этом порог бинаризации  $T$  выбирается равным уровню интенсивности, соответствующему минимуму  $m_k$ , расположенному между глобальным и найденным локальным максимумами (рис. 4). Визуализация сформированной бинарной характеристической функции  $H(i, j)$  при выборе порогового значения  $T = 231$  приводится на рис. 5, а.

Для устранения оставшихся локальных помех, проявляющихся на бинарной характеристической функции, и придания гладкости границам сегментированных областей используется алгоритм постобработки, основанный на применении морфологических операций размыкания и замыкания [7]:

$$\begin{aligned} A \circ B &= (A - B) \oplus B; \\ A \bullet B &= (A \oplus B) - B, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $A$  — множество значений характеристической функции  $H(i, j)$ ;  $B$  — структурирующий элемент, представляющий собой заполненную единичными значениями матрицу размером  $3 \times 3$ .

Данная операция является композицией морфологических операций наращивания  $(A \oplus B) = \{w | (\hat{B})_w \cap A \neq \emptyset\}$  (множество таких смещений  $w$ , при которых множества  $A$  и  $\hat{B}$  совпадают хотя бы в одном элементе;  $\hat{B}$  — центральное отражение множества  $B$ ) и эрозии  $(A - B) = \{w | (\hat{B})_w \subseteq A\}$  (множество таких значений  $w$ , при которых множество  $B$  полностью содержится в множестве  $A$ ) бинарных областей. Обработанное бинарное изображение обозначается как  $H(i, j) \Rightarrow H'(i, j)$ .

Выделение границ костных структур на изображении бинарной характеристической функции целесообразно выполнять с помощью комплексной

морфологической операции  $\chi(A) = A \setminus (A - B) = A \cap (A - B)$ , представляющей собой получение разностного множества  $\chi(A)$  между исходным множеством  $A$  и результатом его эрозии по структурирующему элементу  $B$ , определенному выше. В результате выполнения данной операции образуется изображение границы  $H'(i, j) \Rightarrow G(i, j)$  областей костных структур толщиной в один элемент изображения. Результаты применения морфологических операций к исходному изображению характеристической функции приводятся на рис. 5, б.

### 5. Оценка эффективности сегментации

Этап сегментации является одним из основных источников погрешностей при проведении операционного планирования нейрохирургических реконструктивных вмешательств. Выделение костных структур на томографических изображениях является первым этапом построения виртуальной модели черепного имплантата, и оценить влияние точности сегментации можно только проанализировав конечный результат и все стадии нейрохирургического планирования. Непосредственную оценку качества сегментации можно получить путем анализа степени подавления фона и выделения костных структур в виде связанных областей. Для получения числовой характеристики точности автоматизированной процедуры сегментации вычисляется абсолютная средняя процентная ошибка  $|e_{K\Pi}|$  сегментации костных структур (9):

$$|e_{K\Pi}| = \frac{1}{S_k} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} |P(i, j) - H(i, j)| \cdot 100\%, \quad (9)$$

где  $P(i, j)$  — характеристическая функция, интерактивно указанная специалистом;

$$S_k = \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} P(i, j). \quad (10)$$

Величина  $S_k$ , представляющая согласно формуле (10) сумму значений характеристической функции  $P(i, j)$ , показывает площадь, занимаемую на изображении костными структурами. Удовлетворительным можно считать результат сегментации при  $|e_{K\Pi}| \leq 10\%$ .

Оценить качество сегментации можно визуально, путем наблюдения разностного изображения  $D(i, j)$ , построенного в соответствии с выражением:

$$D(i, j) = |P(i, j) - H'(i, j)|. \quad (11)$$

Разностное изображение  $D(i, j)$ , формируемое согласно выражению (11), позволяет визуально оценить степень соответствия между характеристическими функциями, полученными автоматизированным и интерактивным методами, а также выявить параметры областей с существенными различиями результатов сегментации.

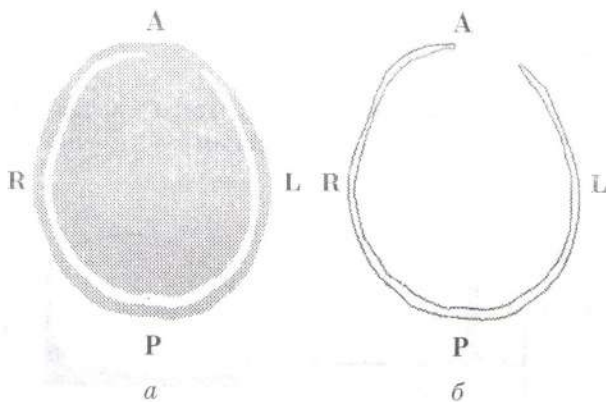


Рис. 5. Результаты работы модуля сегментации: а — изображение бинарной характеристической функции костных структур; б — контурная визуализация костных структур

## 6. Выводы

В результате проведенных исследований разработан комплексный алгоритм автоматизированного выделения костных структур на изображениях КТ-срезов, который позволяет за счет согласования методов предварительной и постобработки изображений повысить эффективность процедуры сегментации. Данные методы должны быть ориентированы не на улучшение визуального восприятия исходных данных, а на их подготовку для наиболее эффективного выделения объектов на этапе сегментации. Предлагаемый алгоритм структурно разделен на три вычислительных блока: предварительной обработки методом медианной фильтрации, устраняющей локальные помехи на исходном томографическом изображении; сегментации, выполняющей определение порога бинаризации по усредненной гистограмме изображения для формирования характеристической функции; постобработки, реализуемой с помощью морфологических операций, выполняющих сглаживание контуров, устранение разрывов и отверстий на изображении бинарной характеристической функции.

Точность алгоритма сегментации определяется степенью соответствия бинарных характеристических функций, полученных в ходе автоматизированной обработки и интерактивного указания специалистом. При проведении экспериментальных исследований на первичном материале диагностического центра ХОКБ погрешность сегментации костных структур не превышала 10 % (объем выборки — 700 КТ-срезов двенадцати пациентов). Полученные данные позволяют на данном этапе считать разработанный алгоритм универсальным для сегментации однородных объектов на томографических изображениях.

Совершенствование алгоритма должно быть направлено на дальнейшее повышение точности сег-

ментации и выполнение процедур многозначной разметки выделенных областей с целью автоматизированного определения характеристик поврежденной области черепа. Для построения виртуальных лофтинговых моделей черепа и соответствующего имплантата необходимо обеспечить формирование линейного списка граничных элементов областей костных структур на каждом изображении из набора томографических срезов.

**Список литературы:** 1. *Вовк Ю. Н., Андреева И. В.* Современные представления о краниопластике // Украинский медицинский альманах. — 1999. — Т. 2. — № 3. — С. 7–14. 2. *Дунаевский А. Е., Макеев Т. И., Ярошенко В. В.* Реконструктивные операции при переломах и дефектах костей свода черепа // Нейрохирургия (Республиканский межведомственный сборник). — К.: Здоров'я, 1999. — С. 101–106. 3. *Jannin P., Fleig O.* A data fusion environment for multimodal and multi-informational neuronavigation // *Comput. aided. surg.* — 2000. — Vol. 5, № 1. — P. 1–10. 4. *Привалова Е. С.* Возможности компьютерной томографии в нейрохирургической практике // Украинский медицинский журнал. — 2000. — № 4 (18). — С. 81–89. 5. *Туркин А. М., Белова Т. В.* Использование трехмерной реконструкции в нейрорентгенологии // Вопросы нейрохирургии. — 2000. — № 3. — С. 23–26. 6. *Поммерт А., Пфлессер Б., Риимер М. и др.* Визуализация объема в медицине // Открытые системы. — 1996. — № 5(19). — С. 56–61. 7. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2006. — 1072 с. 8. *Пуятин Е. П., Аверин С. П.* Обработка изображений в робототехнике. — М.: Машиностроение, 1990. — 330 с. 9. *Панченко Д. С., Пуятин Е. П.* Сравнительный анализ методов сегментации изображений // Радиоэлектроника и информатика. — 1999. — № 4(9). — С. 109–114. 10. *Техническое зрение роботов* / Под ред. А. Пью; Пер. с англ. Д. Ф. Миронова; Под ред. Г. П. Катуса. — М.: Машиностроение, 1987. — 320 с. 11. *Форсайт Д. А., Понс Ж.* Компьютерное зрение. Современный подход; Пер. с англ. — М.: ИД «Вильямс», 2004. — 928 с.

Поступила в редколлегию 09.11.2006

Е. Е. Федоров

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ ИЗОЛИРОВАННОГО СЛОВА В РЕЧЕВОМ СИГНАЛЕ

### 1. Введение

*Постановка проблемы.* В современной отечественной и мировой практике активно ведутся разработки естественно-языковых систем общения «человек–компьютер», одной из составных частей которых может быть система распознавания речи. При создании системы распознавания необходимо решить задачу определения границ речи.

*Анализ исследований.* В работах [1–3], посвященных распознаванию речи, рассматриваются математические модели и методики, не учитывающие при определении границ речи шумы аппаратной части и параметры речи диктора.

### 2. Постановка задачи и предварительная обработка сигнала

*Постановка задачи.* Разработать метод определения границ изолированного слова в речевом сигнале.

*Основной материал.* Для границ речи в статье реализован авторский метод ДАРФ, основывающийся на результатах работы [4].

Акустический сигнал, поступающий через микрофон и звуковую карту в систему распознавания речи, проходит усиление и фильтрацию, а затем оцифровывается. В процессе преобразования сигнала осуществляется подавление внешнего шума, а также шума микрофона и звуковой карты. Во время работы с диктором система распознавания получает звуковые данные  $x_{\Delta}(i)$ , оцифрованные с частотой дискретизации  $f_d$ , через интервалы времени  $\Delta N/f_d$ , где  $\Delta N$  — длина  $x_{\Delta}(i)$ . Эти данные помещаются в буфер  $x$  базы данных. Для звуковых данных  $x$  на каждом текущем интервале  $[l + n_1^*, l + n_2^*]$ , где  $l$  — текущая позиция,  $n_1^*$  и  $n_2^*$  — левая и правая границы изменения длины основного тона конкретного диктора, производится интервальная оценка периода основного тона  $T_{OT}$  аналогично [5].

Согласно работе [6], выделяются четыре группы звуков речи — шумные шипящие согласные, шумные нешипящие согласные, тональные согласные и гласные. Выделение особенностей этих звуков предусматривает определение интервалов речи в отличие от интервалов шума. Методологически осуществляется выделение левых и правых границ этих интервалов. Выделение левой границы производится согласно классификации звуков на шумные шипящие и тональные. Выделение правой границы осуществ-

ляется согласно классификации звуков на шумные нешипящие и звуки речи, относящиеся к тональным и шумным шипящим.

### 3. Выделение левой границы слова

Структура выделения левой границы схематично представлена на рис. 1.

Звук в текущем интервале сигнала является тональным, если выполняется условие  $T_{OT} > 0$ , и является шумным, если выполняется условие  $T_{OT} = 0$ . При оценивании речи на первом этапе, подчиняющемся условию  $T_{OT} > 0$ , выделяются тональные звуки, которые в последующем классифицируются на высокоамплитудные (речь) и низкоамплитудные (шум). При выделении левой границы методом ДАРФ предусмотрен анализ тональных звуков и, соответственно, условий по характеристикам этих звуков, а затем выделение левой границы для особенностей шумных шипящих звуков.

Вначале рассматриваются первые составляющие сигнала — тональные звуки. Такие звуки могут характеризовать речь (т. е. быть тональными согласными или гласными) или быть тональным низкоамплитудным шумом. Для определения смысловой речи и ее отличия от шума используется соотношение

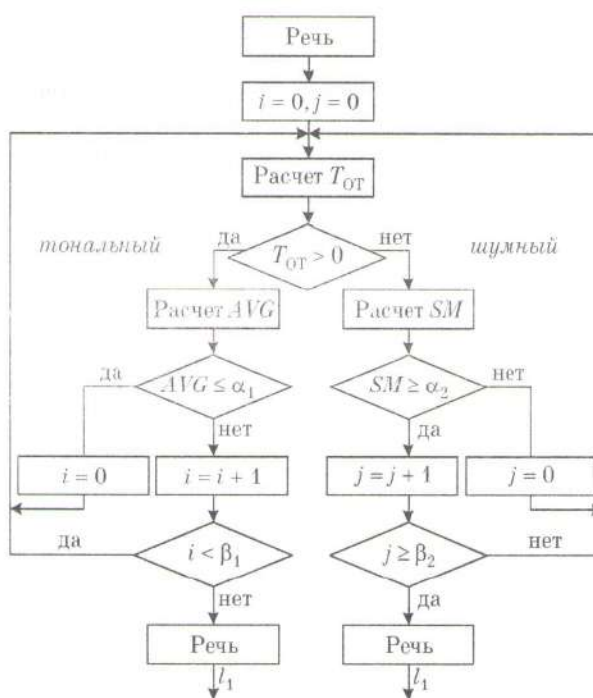


Рис. 1. Структура выделения левой границы

амплитуд, т. е. Вычисляется текущее среднее значение речевого сигнала  $AVG$

$$AVG = \frac{\sum_{n=l}^{l+T_{OT}-1} |x(n)|}{T_{OT}}, \quad l \in \overline{0, N}. \quad (1)$$

Среднее значение шума звуковой карты рассматривается как параметр  $\alpha_1$ , определяемый в режиме обучения, и, соответственно, последующий анализ речи диктора осуществляется путем сравнения с этим параметром.

Если выполняется условие  $AVG > \alpha_1$ , то звук в текущем интервале сигнала является тональным и высокоамплитудным, и в этом случае для него выделяется левая граница слова  $l_1 = l$ . Затем в последующих процедурах вся временная длина сигнала разбивается на интервалы, удовлетворяющие этому условию, и фиксируется количество таких интервалов  $i$ . При этом допускаем, что на этих интервалах сигнал представляет речь, а не шум, если удовлетворяется условие  $i \geq \beta_1$ , где  $\beta_1 = T_{min}^1 / T_{OT}$  — целочисленный параметр речи диктора, характеризующий тональные составляющие речи конкретного диктора:  $T_{min}^1$  — минимальная длина тонального звука, табулированная в [7]. Если выполняется условие  $AVG \leq \alpha_1$ , то звук в текущем интервале сигнала является низкоамплитудным шумом, тогда осуществляется сдвиг  $l = l + T_{OT}$  и оценивание производится на следующем интервале.

Этот подход характеризует одну из составных частей первого этапа распознавания звуков в сигнале (левая часть рис. 1). Поскольку, кроме тональных звуков, в речи могут присутствовать шумные шипящие, удовлетворяющие условию  $T_{OT} = 0$ , то необходимо оговорить условие разделения особенностей этого вида сигнала и шума (правая часть рис. 1). Для определения смысловой речи, представленной шумными шипящими, и ее отличия от функционального шума может использоваться количество строгих минимумов  $SM$  на текущем интервале анализа сигнала  $[l, l + n_1^*]$ . Количество строгих минимумов шумного шипящего звука для речи любого диктора рассматривается как параметр  $\alpha_2$ , определяемый в режиме обучения, и, соответственно, последующий анализ речи диктора осуществляется путем сравнения с этим параметром.

Если выполняется условие  $SM \geq \alpha_2$ , то звук в текущем интервале сигнала является шумным шипящим, и в этом случае для него выделяется левая граница слова  $l_1 = l$ . Затем вся временная длина сигнала разбивается на интервалы, удовлетворяющие этому условию, т. е. выделяются интервалы, на которых сигнал в последующем подвергается проверке на

слитную речь, и фиксируется количество таких интервалов  $j$ . В последующей проверке допускаем, что на этих интервалах сигнал представляет речь, а не шум, если удовлетворяется условие  $j \geq \beta_2$ , где  $\beta_2 = T_{min}^2 / n_1^*$  — целочисленный параметр речи диктора, характеризующий шипящие составляющие речи конкретного диктора;  $T_{min}^2$  — минимальная длина шумного шипящего звука, табулированная в [7]. Если выполняется условие  $SM < \alpha_2$ , то звук в текущем интервале сигнала относится к шуму, тогда оценивание производится на следующем интервале со сдвигом  $l = l + n_1^*$ .

Таким образом, подход, изображенный на рис. 1, позволяет последовательно определять, что сигнал содержит интервалы тональных или шипящих звуков, т. е. в сигнале есть хотя бы один тональный или шипящий звук. В этом случае производится фиксация левой границы  $l_1$ .

После фиксации левой границы временного интервала оценивания слова необходимо определить его правую границу. Методологически при выделении правой границы на первом этапе осуществляется разделение на нешипящие шумные звуки с количеством нестрогих минимумов  $NSM \geq \alpha_3$  и звуки, принадлежащие к остальным трем типам, с количеством нестрогих минимумов  $NSM < \alpha_3$ , где  $\alpha_3$  — параметр речи диктора. Выделение правой границы производится для звуков, классифицированных как шумные нешипящие (паузы).

#### 4. Выделение правой границы слова

Структура выделения правой границы схематично представлена на рис. 2.

Согласно этой структуре осуществляется нахождение количества нестрогих минимумов  $NSM$  на текущем интервале анализа сигнала  $[l, l + n_2^*]$ . Количество нестрогих минимумов шумного нешипящего звука для речи любого диктора на стадии обучения системы рассматривается как параметр  $\alpha_2$ , определяемый при идентификации речи диктора, и, соответственно, текущий анализ звуков речи диктора осуществляется путем сравнения с ним. Это позволяет реализовать уточнение интервальных оценок речи с классификацией ее на шумные нешипящие звуки и звуки речи, относящиеся к тональным и шумным шипящим.

Если выполняется условие  $NSM < \alpha_3$ , то текущий интервал сигнала является тональным или шипящим звуком, маркируется с учетом рис. 2, и оценивание правой границы производится на следующем интервале со сдвигом  $l = l + n_2^*$ . Если выполняется условие  $NSM \geq \alpha_3$ , то текущий интервал сигнала является шумным нешипящим звуком или

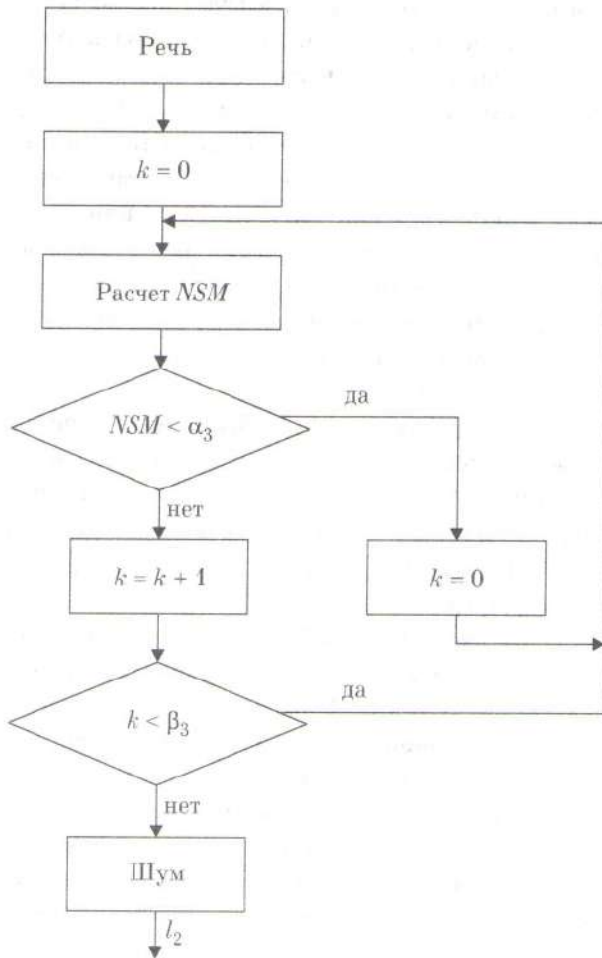


Рис. 2. Структура выделения правой границы

паузой между словами, тогда в этом случае фиксируется правая граница слова  $l_2 = l$ . Согласно изложенному методу ДАРФ выделения левых и правых границ слова, вся длина сигнала разбивается на фиксированные интервалы, удовлетворяющие этому условию, т. е. выделяются те, на которых сигнал в последующем подвергается проверке на слитную речь. Пауза между словами удовлетворяет условию  $k \geq \beta_3$ , где  $\beta_3 = T_{\max}^3 / n_2^*$  — параметр речи диктора, характеризующий шумные нешипящие составляющие речи конкретного диктора;  $T_{\max}^3$  — максимальная длина шумного нешипящего звука, табулированная в [7];  $k$  — количество интервалов. Если это условие не выполняется, интервал маркируется как шумный нешипящий.

Таким образом, подход, изображенный на рис. 2, позволяет последовательно определять, что сигнал содержит интервалы шумных нешипящих звуков или пауз между словами. В этом случае фиксируется правая граница  $l_2$ .

В результате такого анализа выделяется каждое изолированное слово в сигнале  $x(n)$  с границами  $l_1$  и  $l_2$ .

### 5. Оценка параметров речи диктора и алгоритм выделения границ слова

Реализация основных положений, приведенных в методе ДАРФ, в виде алгоритмов обучения позволяет определить численные значения параметров, характеризующих особенности речи конкретного диктора.

Согласно разработанному методу, в режиме обучения по выборке из 1000 произнесенных команд были идентифицированы параметры речи, характеризующие специфику указанного диктора (табл. 1).

Таблица 1

Оценка параметров речи диктора

$P(\beta_1 \geq 4)$	$P(\beta_1 \geq 10)$	$P(\beta_1 \geq 12)$	$P(\alpha_2 \geq 3)$	$P(\alpha_3 \geq 2)$
0,957	0,951	0,954	0,952	0,958

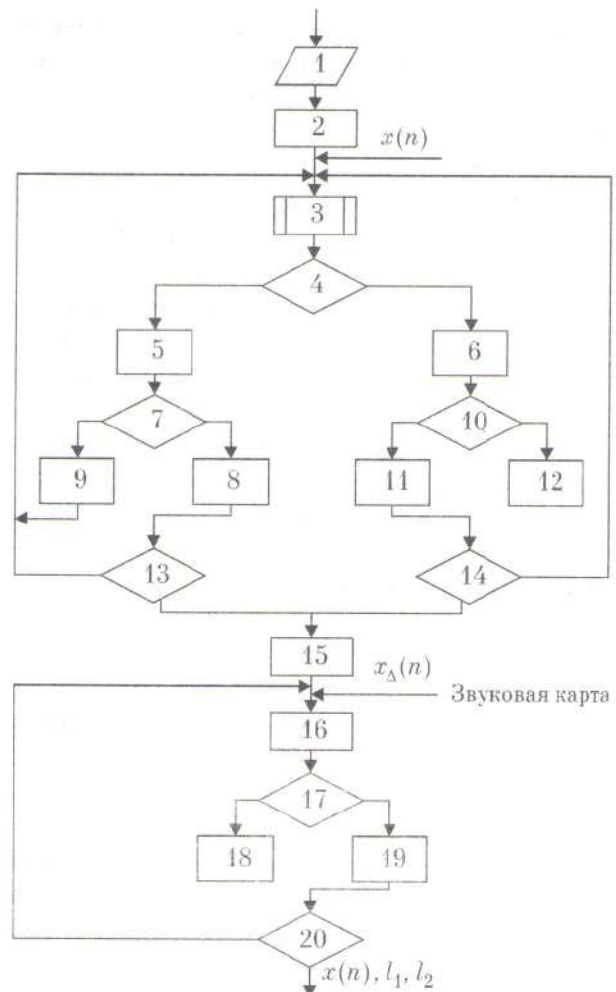


Рис. 3. Блок-схема алгоритма определения границ слова: 1 — задание констант  $T_{\min}^1, T_{\min}^2, T_{\max}^3, f_d, \Delta N$ ; 2 —  $i=0, j=0, l=0, l_1=0$ ; 3 — расчет  $T_{OT}$  методом ВОТФ [5]; 4 —  $T_{OT} > 0$ ; 5 — расчет  $AVG(1)$ ; 6 — расчет  $SM$ ; 7 —  $AVG \leq \alpha_1$ ; 8 —  $i=i+1, l=l+T_{OT}$ ; 9 —  $l=0, l=l+T_{OT}, l_1=l$ ; 10 —  $SM \geq \alpha_2$ ; 11 —  $j=j+1, l=l+n_1^*$ ; 12 —  $j=0, l=l+n_1^*, l_1=l$ ; 13 —  $i < \beta_1$ ; 14 —  $j < \beta_2$ ; 15 —  $k=0, l_2=l$ ; 16 — расчет  $NSM$ ; 17 —  $NSM < \alpha_3$ ; 18 —  $k=0, l=l+n_2^*, l_2=l$ ; 19 —  $k=k+1, l=l+n_2^*$ ; 20 —  $k < \beta_3$

Оценка длины периода основного тона диктора

Левая граница, $n_1^*$ (мс)			Правая граница, $n_2^*$ (мс)		
женщины	мужчины-теноры	мужчины-басы	женщины	мужчины-теноры	мужчины-басы
$P(n_1^* \geq 2,5) = 0,952$	$P(n_1^* \geq 5,9) = 0,958$	$P(n_1^* \geq 9) = 0,953$	$P(n_2^* \geq 6,3) = 0,957$	$P(n_2^* \geq 9,1) = 0,959$	$P(n_2^* \geq 15,5) = 0,954$

В режиме обучения по эталонному произнесению звука на основании метода ВОТФ [5] определяются границы изменения длины периода основного тона  $n_1^*$  и  $n_2^*$  в зависимости от голосового тембра диктора. В табл. 2 приведены их значения, определенные экспериментально для женщин, мужчин-теноров и мужчин-басов. При выборке численностью 600 человек (по 100 человек каждой категории) с произнесением каждым из этих дикторов 10 команд вероятность оценивания границ составила не менее 95 %.

Определение границ слова в процессе распознавания представлено на рис. 3.

На выходе блок-схемы фиксируем границы слов смыслового текста.

### 6. Выводы

*Новизна.* В данной работе произведена разработка авторского метода ДАРФ, определяющего границы изолированного слова и учитывающего шум аппаратурной части и параметры речи диктора.

*Практическое значение.* Основные положения данной работы предназначены для реализации в ин-

теллектуальных системах управления, в которых команды поступают на естественном языке.

**Список литературы:** 1. Рабинер Л. Р., Шафер Р. В. Цифровая обработка речевых сигналов. — М.: Радио и связь, 1981. — 496 с. 2. Freeman D., Sonthcott C., Boyd I. A. Voice activity detector for the Pan-European digital cellular mobile telephone service // IEE Colloquium «Digitized Speech Communication via Mobile Radios». — London. — 1988. — P. 61–65. 3. Аграновский А. В., Зулжарнеев М. Ю., Леднов Д. А. Организация иерархической модели распознавания слитной речи // Искусственный интеллект. — 2001. — № 3. — С. 17–22. 4. Федоров Е. Е., Шелепов В. Ю. Автоматическое определение начала и конца записи речи // Искусственный интеллект. — 2002. — № 4. — С. 295–298. 5. Федоров Е. Е. Выделение длины периода основного тона речевого сигнала // Искусственный интеллект. — 2004. — № 1. — С. 237–242. 6. Современный русский язык: Учеб. для филол. спец. высших учебных заведений / Под ред. В. А. Белошапковой. — М.: Азбуковник, 1997. — 928 с. 7. Златоустова Л. В. Фонетические единицы русской речи. — М.: Изд-во МГУ, 1981. — 108 с.

Поступила в редколлегию 07.09.2006

УДК 004.93

С. Н. Герасия, Н. В. Гибкина, А. В. Ружицкий

## МЕТОДЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕОДНОРОДНЫХ МОДЕЛЕЙ ФАРМАКОДИНАМИКИ

### 1. Введение

В основе процессов жизнедеятельности живых организмов, связанных с развитием, размножением и адаптацией к изменению внешних условий, лежат процессы обмена веществ. Они обеспечивают поступление в организм веществ из внешней среды, химические изменения и превращения этих веществ в организме, вывод во внешнюю среду конечных продуктов жизнедеятельности. Обмен веществ представляет собой непрерывный саморегулирующийся кругооборот элементов в организме, благодаря которому происходит постоянное обновление живой материи.

Любое заболевание сопровождается нарушением обмена веществ, а генетически обусловленные его нарушения служат причиной многих наследственных болезней. Современные медицинские методы исследований позволяют давать количественную оценку содержания того или иного вещества в отдельных органах и выявлять отклонения от нормального протекания процесса обмена даже в ранней стадии заболевания [1]. Однако такие исследования иногда связаны с определенными сложностями, которые могут быть вызваны недостатком информации, полученной с помощью традиционных методов диагностики. Поэтому необходимо усовершенствование существующих приемов анализа и контроля метаболизма, а также разработка принципиально новых методов управления обменными процессами в организмах с целью их наиболее полного изучения и создания оптимальных условий жизнедеятельности. Кроме того, для повышения точности диагностики наряду с лабораторными методами желательнее использовать данные теоретического моделирования процесса транспорта вещества в организме. С помощью модели возможно получить полную качественную и количественную информацию о процессе движения вещества в организме: определить пути поступления места локализации, изменение содержания в различных органах с течением времени, пути выведения из организма.

### 2. Постановка задачи

В настоящее время для моделирования процессов обмена веществ в животных организмах широко применяются методы математического моделирования. В основе такого моделирования лежит метод «камерного анализа», позволяющий заменить реальный процесс кинетически эквивалентной моделью [2]. С помощью этого метода биологический организм изображается в виде совокупности сообщающихся отсеков (камер), ограниченных проницаемой мембраной, в которых равномерно распреде-

ляется исследуемое вещество. В каждую камеру вещество поступает либо непосредственно во время введения, либо с течением времени переходит из той камеры, в которую было введено.

Камеры представляют собой кинетически однородные фракции вещества (например, это могут быть отдельные органы и ткани организма). Однако, поскольку с точки зрения физиологического строения некоторые внутренние органы (например, мягкие и твердые ткани скелета) имеют неоднородную структуру, то не всегда возможно представлять их в виде одной камеры. Кроме того, может возникнуть и обратная проблема, когда группа органов обладает сходными кинетическими характеристиками, и поэтому в модели они должны быть выражены одной камерой. Эта задача наталкивается на определенные трудности, поскольку в случае «объединения» органов не представляется возможным определить размеры таких камер.

Наиболее простой моделью является однокамерная модель, которая используется для анализа концентрации вещества в крови, плазме и сыворотке. Однако многие вещества поступают в ткани и выходят из них очень медленно [3]. Кроме того, однокамерная модель предполагает, что скорость выведения вещества из организма постоянна и характеризуется константой выведения или элиминации  $k_{\text{вых}}$ . Эта константа служит для количественной оценки скорости выведения вещества из организма и численно равна тангенсу угла наклона полулгарифмической кривой к оси абсцисс. Но так как скорость снижения концентрации многих веществ пропорциональна их концентрации, то кинетические данные, полученные при математических расчетах однокамерной модели, часто не соответствуют истине.

На практике более приемлемы двух- и трехкамерные модели. За центральную камеру, как и прежде, принимают плазму крови и хорошо перфузируемые органы (сердце, легкие, печень, почки, эндокринные железы); за периферическую — плохо перфузируемые органы (мышцы, кожа, жир). В этих камерах вещество распределяется с разной скоростью: быстро — в центральной и медленно — в периферических, после чего частично выводится [3].

В биокинетических исследованиях описанные модели используются для оценки изменений концентрации веществ во времени в отдельных камерах и во всем организме в целом.

В практических исследованиях количество рассматриваемых в модели органов и тканей, а также характер связей между ними определяются исходя из биохимических и физиологических особенностей

обмена конкретного вещества и строения организма. В модель включаются наиболее существенные, с точки зрения метаболизма данного вещества, органы и ткани организма. Заметим также, что на практике обычно пользуются моделями с небольшим количеством камер (двух- и трехкамерные модели), поскольку определение транспортных констант для них не вызывает особого труда и в большинстве случаев возможно получить аналитическое решение для этих величин.

Поскольку процессы обмена веществ между отдельными органами происходят в основном через кровь, то для их исследования будем использовать  $n$ -камерную модель, представленную на рис. 1 (центральной камерой крови является состояние  $y_1$ ).

Математически модель обмена веществ в организме может быть записана с помощью системы дифференциальных уравнений колмогоровского вида [4]

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = -y_1 \sum_{i=1}^n k_{1i}(t) + \sum_{i=2}^n y_i k_{i1}(t); \\ \frac{dy_i}{dt} = k_{i1}(t)y_1 - k_{i1}(t)y_i, \quad i = \overline{2, n}, \end{cases} \quad (1)$$

при заданных начальных условиях  $y_i(t_0) = y_i^0, i = \overline{1, n}$ .

В выражении (1) и на рис. 1  $y_i$  обозначают камеры, через которые изучаемое вещество проходит в процессе своего транспорта в организме, и указывают содержание этого вещества в данных камерах. Каждой камере  $y_i$  ставится в соответствие состояние некоторого марковского случайного процесса. Внешняя среда представляется как одно из состояний системы  $y_1$ . Коммуникационные константы  $k_{ij}(t)$  скорости переноса исследуемого вещества из  $i$ -й камеры в  $j$ -ю,  $i, j = \overline{1, n}$ , являются неизвестными и подлежат определению.

Матрица транспортных констант  $K = \|k_{ij}(t)\|$  системы (1)

$$K(t) = \begin{pmatrix} -(k_{12} + \dots + k_{1n}) & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & -k_{21} & 0 & \dots & 0 \\ k_{31} & 0 & -k_{31} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & 0 & 0 & \dots & -k_{n1} \end{pmatrix} \quad (2)$$

является инфинитезимальной, так как

$$k_{ij}(t) = - \sum_{j=1, j \neq i}^n k_{ij}(t) \leq 0, \quad \sum_{j=1}^n k_{ij}(t) = 0$$

для всех  $i = \overline{1, n}$ . Эта матрица сильно разрежена, поскольку большинство камер не взаимодействуют друг с другом непосредственно; контакт происходит только через кровь. Ненулевыми являются только диагональные элементы, элементы первой строки и первого столбца.

Данная модель может использоваться также для прогнозирования поведения процесса при нарушениях обмена. С помощью прогнозов можно управлять перемещением вещества в различных камерах и нормализовать процесс транспорта по системе в целом. Зная, каким должно быть содержание микро-

элемента в норме, можно подобрать функцию воздействия таким образом, чтобы вывести траекторию системы на заранее заданное распределение, то есть стабилизировать содержание вещества в органах и тканях за определенное время. Заметим, что выбор функции возмущения определяется также и дополнительными условиями, такими, например, как время, за которое нужно нормализовать процесс обмена, или получить минимальное отклонение от значений в норме [4].

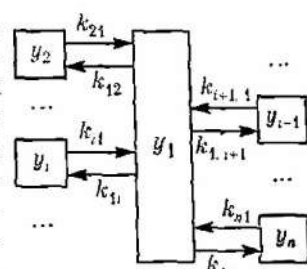


Рис. 1.  $n$ -камерная модель транспорта вещества в организме

### 3. Определение коммуникационных констант системы переноса веществ и построение аппроксимирующего выражения для функции, описывающей содержание вещества в плазме крови

Определение коммуникационных констант осуществляется в несколько этапов. На первом этапе в (1) вместо  $y_1$  подставляется его аппроксимирующее выражение  $y_1 \approx f(t)$  — функция, которая с заданной точностью описывает содержание вещества в плазме крови с течением времени.

В работе [5] показано, что в качестве аппроксимирующей функции для  $y_1$  удобно использовать выражение

$$f(t) = \sum_{j=1}^m a_j e^{b_j t}, \quad (3)$$

где  $m$  — число слагаемых в сумме, причем  $2m < M$ ;  $a_j, b_j$  — неизвестные параметры аппроксимации, подлежащие определению. Поскольку перераспределение вещества в крови с течением времени представляет собой аperiodический убывающий процесс, то величины  $b_j$  действительны,  $b_j < 0$ . Функция вида (3) удобна для дальнейшего интегрирования и совпадает с общей формой решения  $y_1$  системы линейных дифференциальных уравнений (1).

Метод определения коэффициентов  $a_j, b_j$  заключается в следующем [5]. Используя экспериментальные данные о содержании меченого вещества в крови  $\hat{y}_j$  в моменты времени

$$t_j = t_1 + (j-1)h, \quad j = 1, \dots, M,$$

где  $t_1$  — момент первого получения экспериментальной информации,  $h$  — шаг наблюдений, составим систему уравнений

$$\hat{y}_j = \sum_{i=1}^m a_i e^{b_i(t_1 + (j-1)h)}, \quad j = 1, 2, \dots, M. \quad (4)$$

Обозначим  $z_j = e^{b_j h}$ , тогда выражение (4) примет вид

$$\hat{y}_j = \sum_{i=1}^m a_i e^{b_i t_1} z_i^{(j-1)}, \quad j = 1, 2, \dots, M. \quad (5)$$

Известно, что система  $\{e^{t+jh}\}_{j=1}^m$  линейно зависима, поэтому  $z_1, z_2, \dots, z_m$  являются корнями некоторого полинома вида

$$C_1 + C_2 z + C_3 z^2 + \dots + C_{m-1} z^{m-2} + C_m z^{m-1} + z^m = 0. \quad (6)$$

Умножим первое из уравнений системы (5) на  $C_1$ , второе уравнение на  $C_2, \dots, m$ -е уравнение на  $C_m$  и сложим первые  $m$  уравнений. Получим с учетом (6)

$$\begin{aligned} C_1 \sum_{i=1}^m a_i e^{b_i t_1} + C_2 \sum_{i=1}^m a_i e^{b_i t_1} z + C_3 \sum_{i=1}^m a_i e^{b_i t_1} z^2 + \dots \\ + C_m \sum_{i=1}^m a_i e^{b_i t_1} z^{m-1} = \\ = \sum_{i=1}^m [a_i e^{b_i t_1} (C_1 + C_2 z + \dots + C_m z^{m-1})] = \\ = \sum_{i=1}^m a_i e^{b_i t_1} (-z^m) = -\hat{y}_{m+1}. \end{aligned}$$

Повторив эту процедуру далее, начиная со второго, затем с третьего и последующих уравнений, получим систему из  $M-m$  уравнений

$$\begin{cases} \hat{y}_1 C_1 + \hat{y}_2 C_2 + \dots + \hat{y}_m C_m = -\hat{y}_{m+1} \\ \hat{y}_2 C_1 + \hat{y}_3 C_2 + \dots + \hat{y}_{m+1} C_m = -\hat{y}_{m+2} \\ \dots \\ \hat{y}_{M-m} C_1 + \hat{y}_{M-(m-1)} C_2 + \dots + \hat{y}_{M-1} C_m = -\hat{y}_M \end{cases}$$

или

$$\sum_{i=1}^m \hat{y}_{i-(j-1)} C_i = -\hat{y}_{m+j}, \quad j = 1, 2, \dots, M-m.$$

В последней системе число уравнений больше числа неизвестных, поэтому в общем случае она несовместна. Мы определим такие значения параметров  $C_i, i = 1, 2, \dots, m$ , при которых все уравнения системы удовлетворяются с наименьшей погрешностью. Решение будем искать методом наименьших квадратов, суть которого заключается в минимизации функционала

$$F = \sum_{j=1}^{M-m} \left[ -\hat{y}_{m+j} - \sum_{i=1}^m \hat{y}_{i+(j-1)} C_i \right]^2 \rightarrow \min_{C_i, i=1, m}$$

Минимальное значение этого функционала соответствует точкам, в которых

$$\frac{\partial F}{\partial C_k} = -2 \sum_{j=1}^{M-m} \left[ \left( -\hat{y}_{m+j} - \sum_{i=1}^m \hat{y}_{i+(j-1)} C_i \right) \cdot \hat{y}_{k+(j-1)} \right] = 0, \quad k = \overline{1, m}.$$

Разделив полученное выражение на  $-2$  и затем раскрыв скобки, получим так называемую нормальную систему из  $m$  линейных уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{M-m} \left( \sum_{i=1}^m \hat{y}_{i+(j-1)} \cdot C_i \right) \cdot \hat{y}_j = - \sum_{j=1}^{M-m} \hat{y}_{m+j} \cdot \hat{y}_j, \\ \sum_{j=1}^{M-m} \left( \sum_{i=1}^m \hat{y}_{i+(j-1)} \cdot C_i \right) \cdot \hat{y}_{j+1} = - \sum_{j=1}^{M-m} \hat{y}_{m+j} \cdot \hat{y}_{j+1}, \\ \dots \\ \sum_{j=1}^{M-m} \left( \sum_{i=1}^m \hat{y}_{i+(j-1)} \cdot C_i \right) \cdot \hat{y}_{j+(m-1)} = - \sum_{j=1}^{M-m} \hat{y}_{m+j} \cdot \hat{y}_{j+(m-1)}. \end{cases} \quad (7)$$

Решая эту систему любым из известных аналитических или численных методов, найдем значения параметров  $C_i, i = \overline{1, m}$ , которые затем используем для определения корней полинома (6). Каждый из корней  $z_k, k = \overline{1, m}$ , этого полинома может быть записан в виде

$$z_k = |z_k| e^{i\varphi_k}.$$

Тогда из выражения  $z_k = e^{b_k h}, k = \overline{1, m}$ , легко найти значения неизвестных параметров  $b_k$ :

$$b_k = \frac{(\ln |z_k| + i\varphi_k)}{h}, \quad k = \overline{1, m}.$$

Заметим, что поскольку для данной задачи вещественны  $b_k, k = \overline{1, m}$ , вещественны, то

$$b_k = \frac{\ln z_k}{h}, \quad k = \overline{1, m}.$$

Теперь исходную функциональную зависимость (3) можно представить в виде уравнения

$$f(t) = a_1 \varphi_1(t) + a_2 \varphi_2(t) + \dots + a_m \varphi_m(t), \quad (8)$$

где  $\varphi_k = e^{b_k t} (k = \overline{1, m})$  — известные функции.

Параметры  $a_k, k = \overline{1, m}$ , можно определить из системы (4) с известными величинами  $b_k$ . Поскольку в этой системе число уравнений  $M$  больше числа неизвестных  $m$ , то в общем виде она несовместна, и мы применим для ее решения метод наименьших квадратов.

Минимум функционала

$$\Phi = \sum_{j=1}^M \left( \hat{y}_j - \sum_{i=1}^m a_i \varphi_i(t_j) \right) \rightarrow \min_{a_i, i=1, m}$$

достигается в точке, в которой все частные производные  $\frac{\partial \Phi}{\partial a_k} = 0, k = \overline{1, m}$ , то есть

$$\frac{\partial \Phi}{\partial a_k} = -2 \sum_{j=1}^M \left[ \left( \hat{y}_j - \sum_{i=1}^m a_i \varphi_i(t_j) \right) \cdot \varphi_k(t_j) \right] = 0, \quad k = \overline{1, m}.$$

Нормальная система, соответствующая данным выражениям, имеет вид:

$$\begin{cases} d_{11} a_1 + d_{12} a_2 + \dots + d_{1m} a_m = b_1, \\ d_{21} a_1 + d_{22} a_2 + \dots + d_{2m} a_m = b_2, \\ \dots \\ d_{m1} a_1 + d_{m2} a_2 + \dots + d_{mm} a_m = b_m, \end{cases} \quad (9)$$

где  $d_{ik} = \sum_{j=1}^n \varphi_i(t_j) \cdot \varphi_k(t_j), b_i = \sum_{j=1}^n \varphi_i(t_j) \cdot \hat{y}_j, i = \overline{1, m}$ , в  $k = \overline{1, 2, \dots, m}$ .

Оценка качества аппроксимации функции (3) может быть выполнена с помощью вычисления среднеквадратичной погрешности аппроксимации:

$$СК = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{(f(t_i) - \hat{y}_i)^2}{\hat{y}_i} \right]^{1/2} \cdot 100\%. \quad (10)$$

где  $f(t_i)$  — значения аппроксимирующего выражения (3) в точках  $t_i$ ;  $\hat{y}_i$  — экспериментальные данные о содержании исследуемого вещества в крови в моменты времени  $t_i$ ;  $M$  — количество моментов времени, в которые снималась экспериментальная информация. Будем считать, что точность аппроксимации экспериментальных результатов достаточна, если средняя квадратичная погрешность аппроксимации не превышает значение относительной погрешности измерения в эксперименте. Используя оценку качества аппроксимации, можно подбирать оптимальное число слагаемых в выражении (3).

#### 4. Определение транспортных коэффициентов методом наименьших квадратов

После того, как с заданной точностью построено выражение  $f(t)$ , аппроксимирующее функцию  $y_1$  содержания элемента в крови, могут быть получены коммуникационные константы системы уравнений (1). Замена выражения для  $y_1$  функцией  $f(t)$  вида (3) позволяет разложить систему (1) на  $(n-1)$  независимых линейных дифференциальных уравнений первого порядка вида

$$\frac{dy_i}{dt} = -k_{i1}y_i + k_{i1}f(t), \quad i = 2, \dots, n, \quad (11)$$

каждое из которых соответствует элементарной однокамерной модели обмена исследуемого вещества в отдельных органах и тканях.

Аппроксимирующая функция  $f(t)$  из (3) задает характер поступления вещества в камеру  $i$ . Таким образом, задача одновременного определения  $2(n-1)$  неизвестных параметров системы (1) сводится к нахождению двух параметров каждого из  $(n-1)$  уравнений вида (11). При этом значительно возрастает точность вычислений. Решение каждого из уравнений (11) может быть записано в виде

$$y_i(t) = k_{i1} \cdot e^{-k_{i1}t} \int e^{k_{i1}t} \cdot f(t) dt + C e^{-k_{i1}t}, \quad i = 2, 3, \dots, n, \quad (12)$$

где  $C$  — константа интегрирования.

$$\text{Так как в рассматриваемой задаче } f(t) = \sum_{j=1}^m a_j e^{b_j t},$$

то решение каждого из уравнений (11) принимает вид

$$y_i(t) = k_{i1} \sum_{j=1}^m \frac{a_j}{k_{i1} + b_j} \left( e^{b_j t} - e^{-k_{i1} t} \right) \quad (13)$$

при известных значениях  $a_j, b_j$ .

Значение константы интегрирования  $C$  в выражении (13) определено из начальных условий  $y_1(t_0) = y_1^0, y_i(t_0) = 0, i = 2, 3, \dots, n$ , то есть в предположении, что вещество поступает в организм однократно через кровь.

Приведем алгоритм нахождения коэффициентов  $k_{i1}$  и  $k_{i1}$  для  $i$ -го уравнения (13). Будем рассматривать выражение (13) как некоторую функцию трех переменных  $\varphi(t, k_{i1}, k_{i1})$ :

$$y_i(t) = \varphi(t, k_{i1}, k_{i1}) = k_{i1} \sum_{j=1}^m \frac{a_j}{k_{i1} + b_j} \left( e^{b_j t} - e^{-k_{i1} t} \right) \quad (14)$$

При фиксированном  $i$  по имеющимся экспериментальным данным  $\hat{y}_i$  при  $t = t_l$  ( $l = \overline{1, M}$ ) можно составить систему из  $M$  уравнений вида (13)

$$\hat{y}_l = \varphi(t_l, k_{i1}, k_{i1}) = k_{i1} \sum_{j=1}^m \frac{a_j}{k_{i1} + b_j} \left( e^{b_j t_l} - e^{-k_{i1} t_l} \right), \quad l = 1, 2, \dots, M. \quad (15)$$

Если бы значения  $\hat{y}_l$  были известны точно, то для определения неизвестных параметров  $k_{i1}, k_{i1}$  достаточно было бы решить любые два уравнения системы (15). Полученные значения в таком случае будут удовлетворять и всем остальным уравнениям системы. Но поскольку величины  $\hat{y}_l$  ( $l = \overline{1, M}$ ) имеют погрешность измерений, то решение, полученное из некоторых двух уравнений системы (15), не будет удовлетворять остальным уравнениям. Система (15) в общем случае является несовместной. Под ее решением мы будем понимать такие величины  $k_{i1}, k_{i1}$ , при которых с наименьшей погрешностью удовлетворяются все уравнения (15).

Решив любые два уравнения системы (15), определим величины  $k_{i1}^0, k_{i1}^0$  и зададим поправки  $\alpha_{i1}, \alpha_{i1}$  к этим значениям. Тогда общее решение будет иметь вид

$$k_{i1} = k_{i1}^0 + \alpha_{i1}, \quad k_{i1} = k_{i1}^0 + \alpha_{i1}.$$

Разложив правую часть уравнений (15) в ряд Тейлора в окрестности точки  $(k_{i1}^0, k_{i1}^0)$  и ограничившись линейными относительно  $\alpha_{i1}, \alpha_{i1}$  слагаемыми, получим

$$\varphi(t_l, k_{i1}, k_{i1}) = \varphi(t_l, k_{i1}^0, k_{i1}^0) + \varphi'_{k_{i1}}(t_l, k_{i1}^0, k_{i1}^0) \cdot \alpha_{i1} + \varphi'_{k_{i1}}(t_l, k_{i1}^0, k_{i1}^0) \cdot \alpha_{i1}, \quad (16)$$

где

$$\varphi'_{k_{i1}}(t_l, k_{i1}^0, k_{i1}^0) = \sum_{j=1}^m \frac{a_j b_j}{(k_{i1}^0 + b_j)^2} \left( e^{b_j t_l} - e^{-k_{i1}^0 t_l} \right), \quad (17)$$

$$\varphi'_{k_{i1}}(t_l, k_{i1}^0, k_{i1}^0) = k_{i1}^0 \sum_{j=1}^m \frac{a_j t_l}{k_{i1}^0 + b_j} e^{-k_{i1}^0 t_l}. \quad (18)$$

При  $l = 1, 2, \dots, M$  получим из (16) систему  $M$  линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных  $\alpha_{i1}, \alpha_{i1}$ :

$$\varphi'_{k_{i1}}(t_l, k_{i1}^0, k_{i1}^0) \cdot \alpha_{i1} + \varphi'_{k_{i1}}(t_l, k_{i1}^0, k_{i1}^0) \cdot \alpha_{i1} = \hat{y}_l - \varphi(t_l, k_{i1}^0, k_{i1}^0).$$

Данная система несовместна, поскольку число уравнений в ней больше числа неизвестных. Поэтому будем искать такие значения неизвестных параметров, которые удовлетворяют все уравнения системы с максимальной точностью.

Для определения  $\alpha_{i1}, \alpha_{i1}$  найдем минимум функционала

$$S = \sum_{i=1}^M \left\{ \begin{aligned} & [y_i^i - \varphi(t_i, k_{ii}^0, k_{i1}^0)] - \\ & - [\varphi'_{k_{ii}}(t_i, k_{ii}^0, k_{i1}^0) \cdot \alpha_{ii} + \\ & + \varphi'_{k_{i1}}(t_i, k_{ii}^0, k_{i1}^0) \cdot \alpha_{i1}] \end{aligned} \right\}^2 \rightarrow \min_{\alpha_{ii}, \alpha_{i1}}$$

Как известно, минимальное значение этого функционала достигается в точке, в которой  $\frac{\partial S}{\partial \alpha_{ii}} = 0$ ,  $\frac{\partial S}{\partial \alpha_{i1}} = 0$ . отсюда после несложных преобразований получим нормальную систему метода наименьших квадратов:

$$\left\{ \begin{aligned} & \sum_{i=1}^M [\varphi'_{k_{ii}}(t_i, k_{ii}^0, k_{i1}^0) \cdot \alpha_{ii} + \varphi'_{k_{i1}}(t_i, k_{ii}^0, k_{i1}^0) \cdot \alpha_{i1}] \times \\ & \times \varphi'_{k_{ii}}(t_i, k_{ii}^0, k_{i1}^0) = \\ & = \sum_{i=1}^M [y_i^i - \varphi(t_i, k_{ii}^0, k_{i1}^0)] \cdot \varphi'_{k_{ii}}(t_i, k_{ii}^0, k_{i1}^0), \\ & \sum_{i=1}^M [\varphi'_{k_{ii}}(t_i, k_{ii}^0, k_{i1}^0) \cdot \alpha_{ii} + \varphi'_{k_{i1}}(t_i, k_{ii}^0, k_{i1}^0) \cdot \alpha_{i1}] \times \\ & \times \varphi'_{k_{i1}}(t_i, k_{ii}^0, k_{i1}^0) = \\ & = \sum_{i=1}^M [y_i^i - \varphi(t_i, k_{ii}^0, k_{i1}^0)] \cdot \varphi'_{k_{i1}}(t_i, k_{ii}^0, k_{i1}^0). \end{aligned} \right.$$

число уравнений которой совпадает с числом неизвестных.

Подставив в эту систему выражения (17) и (18) и решив ее любым из аналитических или численных методов, найдем значения поправок  $\alpha_{ii}$ ,  $\alpha_{i1}$ , которые затем используем для определения транспортных коэффициентов:

$$k_{ii} = k_{ii}^0 + \alpha_{ii}, \quad k_{i1} = k_{i1}^0 + \alpha_{i1}.$$

Таким образом, решена задача определения транспортных коэффициентов для каждой  $i$ -й камеры исследуемой системы. В дальнейшем полученные данные могут быть уточнены для всей модели в целом [6].

В случае, когда количество камер в модели велико, для определения параметров системы также применяются комбинации численных методов, позволяющие локализовать искомые величины в некоторых окрестностях и затем уточнить их значения с заданной степенью точности. Предварительная оценка для параметров  $k_{ij}$  в этом случае может быть получена из решения уравнения

$$y_i(t_j) = \bar{f}(t_j) \cdot \frac{k_{ii}}{k_{i1}} \cdot [1 - e^{-k_{i1} t_j}] \quad (19)$$

на каждом из временных интервалов  $\Delta t_j = t_j - t_{j-1}$ . Здесь  $\bar{f}(t_j)$  — усредненное по времени значение функции  $f(t)$  на интервале  $\Delta t_j = t_j - t_{j-1}$ . Из этого выражения при больших значениях  $t_j$ , когда  $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-k_{i1} t} \rightarrow 0$ , можно найти отношение  $k_{ii}/k_{i1}$ . Оценку для величины  $k_{i1}$  можно получить, если переписать выражение (19) в виде:

$$k_{i1} = \frac{1}{t_j} \ln \left( 1 - \frac{y_i(t_j) \cdot k_{ii}}{\bar{f}(t_j) \cdot k_{ii}} \right)$$

Эта оценка может быть использована для уменьшения времени вычислений в качестве начального приближения в численных методах расчета коммуникационных констант.

Оценить степень соответствия расчетных данных норме можно уже на этапе определения коммуникационных констант. Поскольку транспорт вещества в организме через каждый орган осуществляется с определенной заранее известной скоростью, то, анализируя рассчитанные величины  $k_{ij}$  ( $i, j = 1, \dots, n$ ), можно сделать вывод об отсутствии или наличии заболевания, его характере и степени тяжести. Заметим, что для установления правильного диагноза необходимо производить оценку всех констант переноса в совокупности [7, 8].

### 5. Выводы

В статье исследуется общая математическая модель процесса кинетики химических веществ в живом организме. Данная модель учитывает временную неоднородность процесса и поэтому в большей степени подходит для описания реальных процессов, чем ее однородные аналоги. Предложен метод оценивания концентрации исследуемого вещества в отдельных камерах и в организме в целом, что позволяет управлять перемещением вещества в различных камерах и нормализовать процесс транспорта по системе.

Для решения задачи диагностики и оптимизации режимов лечения разработан пакет программ, позволяющий на основе экспериментальных данных исследовать картину транспорта вещества в организме. В случае отклонений от нормы программа производит расчеты схемы лечения или позволяет корректировать уже существующую схему с учетом экспериментально полученных данных.

**Список литературы:** 1. Белоусов Ю. Б., Моисеев В. С., Лепахин В. К. Клиническая фармакология и фармакотерапия. — М.: Универсум, 1993. — 400 с. 2. Atkins G. L. Multicompartment Models for Biological Systems. — London, 1969. — 196 p. 3. Радионуклидная диагностика / Под ред. Ф. М. Лясса. — М.: Медицина, 1983. — 280 с. 4. Герасин С. П., Гибкина Н. В. Неоднородная марковская модель процесса массопереноса в условиях ограниченной // Математичне моделювання. — 2003. — № 2. — С. 7–10. 5. Попов Е. В. Определение параметров многокамерных моделей // Комплексное образование и метаболизм радиоактивных изотопов. — Свердловск: ИММ УНЦ АН СССР. — 1976. — С. 99–107. 6. Матвеев А. Ю. Математическая модель циркуляции лимфоцитов в организме человека // Математические модели и методы анализа медико-биологических данных. — 1990. — С. 83–97. 7. Герасин С. Н., Паршин О. В. Оптимизация режимов дозирования лекарственных препаратов // Радиоэлектроника и информатика. — 2002. — № 3. — С. 120–123. 8. Гибкина Н. В. Программный модуль для анализа кинетики химических веществ в живом организме // Радиоэлектроника и информатика. — 2003. — № 2. — С. 67–71.

Поступила в редколлегию 30.11.2006

УДК 519.81

**Метод решения общей задачи компараторной идентификации моделей многофакторного оценивания** / В. В. Бескоровайный, Э. Г. Петров, И. В. Трофименко // Бионика интеллекта: Научн.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 3–7.

Рассматривается применение технологии компараторной идентификации для выбора вида и значений параметров моделей многофакторного оценивания. Предложены постановка, математические модели и метод решения общей задачи для предпочтений лица, принимающего решения, заданных в виде бинарных отношений эквивалентности, предпочтения и нестрогого предпочтения. Предложенный метод позволяет определить параметры функций полезности частных критериев без дополнительной информации.

Ил.: 2. Библиогр.: 12 назв.

УДК 519.81

**Метод розв'язання загальної задачі компараторної ідентифікації моделей багатofакторного оцінювання** / В. В. Бескоровайний, Е. Г. Петров, І. В. Трофименко // Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 3–7.

Розглядається застосування технології компараторної ідентифікації для вибору виду і значень параметрів моделей багатofакторного оцінювання. Запропоновано постановку, математичні моделі та метод розв'язання загальної задачі для переваг особи, що приймає рішення, заданих у вигляді бинарних відношень еквівалентності, переваги та нестрокої переваги. Запропонований метод дозволяє визначати параметри функції корисності часткових критеріїв без додаткової інформації.

Ил.: 2. Бібліогр.: 12 найм.

UDC 519.81

**Method of deciding a general problem of comparatory identification the models for multifactoring estimations** / V. V. Beskorovainyi, E. G. Petrov, I. V. Trofimenko // Bionica intellekta: Sci. Mag. — 2006. — No. 2 (65). — P. 3–7.

The application of comparatory identification technologies for choice of type and best parameters values of multifactoring estimation models is considered. The statement, method and mathematical models on base of shaping the binary relations of equivalence, preferences and permissive preference as well as method of deciding the problems are suggested. The offered method is allowed to define parameters of quality functions of locale criterions without additional information.

Fig.: 2. Ref.: 12 items.

УДК 519.71

**Аппроксимация многомерных функций с помощью нейронной сети СМАС** / О. Г. Руденко, А. В. Островерхий, Н. Н. Островерхая // Бионика интеллекта: Научн.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 8–13.

Рассматривается задача аппроксимации многомерных функций сетями СМАС различной архитектуры. Показано, что для решения данной задачи весьма эффективными являются иерархическая и линейная архитектуры при выборе в качестве базовой параболической функции. При этом удается существенно сократить объем требуемой памяти сети.

Ил.: 10. Табл.: 2. Библиогр.: 8 назв.

УДК 519.71

**Апроксимація багатовимірних функцій за допомогою нейронної мережі СМАС** / О. Г. Руденко, О. В. Островерхий, Н. М. Островерха // Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 8–13.

Розглядається задача апроксимації багатовимірних функцій мережами СМАС різної архітектури. Показано, що для розв'язання цієї задачі досить ефективними є ієрархічна та лінійна архітектури при виборі в якості базисної параболічної функції. При цьому вдається суттєво скоротити обсяг необхідної пам'яті мережі.

Ил.: 10. Табл.: 2. Бібліогр.: 8 найм.

UDC 519.71

**Approximation of multidimensional functions by the CMAC neuron network** / O. Rudenko, O. Ostroverkhyy, N. Ostroverkhaya // Bionica intellekta: Sci. Mag. — 2006. — No. 2 (65). — P. 8–13.

The problem of approximation of multidimensional functions by the CMAC networks of different architecture is examined. It is shown that hierarchical and linear architectures with parabolic basis functions are very effective in solution of this problem. Also it is possible to reduce the amount of required memory of the network.

Fig.: 10. Tab.: 2. Ref.: 8 items.

УДК 519.7

**Синтез бинарных логических сетей и особенности их функционирования** / И. А. Ефимова, В. А. Лещинский, В. В. Токарев, Г. Г. Четвериков // Бионика интеллекта: Научн.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 14–18.

Работа посвящена разработке алгебро-логических средств моделирования бинарных логических сетей для формализации многих информационных процессов, в том числе разработки интеллектуальных систем общения с компьютером на естественном языке. Рассмотрен вопрос о функционировании моделей бинарных логических сетей, базирующихся на линейном логическом операторе как инструменте решения логических уравнений, и о методе схемной реализации бинарных логических сетей.

Ил.: 7. Библиогр.: 7 назв.

УДК 519.7

**Синтез бінарних логічних мереж та особливості їх функціонування** / І. О. Єфімова, В. О. Лещинський, В. В. Токарев, Г. Г. Четвериков // Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 14–18.

Роботу присвячено розробці алгебро-логічних засобів моделювання бінарних логічних мереж для формалізації багатьох інформаційних процесів, включаючи розробку інтелектуальних систем спілкування з комп'ютером природною мовою. Розглянуто питання про функціонування моделей бінарних логічних мереж, які базуються на лінійних логічних операторах як інструменті для розв'язування логічних рівнянь, та про метод схемної реалізації бінарних логічних мереж.

Ил.: 7. Библиогр.: 7 найм.

UDC 519.7

**The synthesis of binary logical network and its functional feature** / I. A. Efimova, V. A. Leshchinsky, V. V. Tokarev, G. G. Chetverikov // Bionica intellekta: Sci. Mag. — 2006. — No. 2 (65). — P. 14–18.

This work is devoted to algebra-logical model building of binary logical network for formalization of information activity, included the intelligent interface engineering on natural language. The functional feature of binary logical network based on linear logical operators as instrument of solution of logical equation is considered. Also the method of binary logical network realization as switching circuits is took up.

Fig.: 7. Ref.: 7 items.

---

УДК 681.518:004.912

**О визуальном кодировании информации на основе идентификации когнитивных функций человека-оператора** / А. Л. Ерохин // Бионика интеллекта: Научн.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 19–26.

Рассматривается решение задачи визуального кодирования информации для моделирования психофизиологических состояний человека-оператора. Предложена методика исследования психофизиологического состояния человека-оператора. Рассмотрены пути разработки метода адаптации когнитивных функций человека-оператора к воздействию стрессоров.

Табл.: 5. Библиогр.: 18 назв.

УДК 681.518:004.912

**Про візуальне кодування інформації на основі ідентифікації когнітивних функцій людини-оператора** / А. Л. Єрохін // Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 19–26.

Розглядається розв'язання задачі візуального кодування інформації для моделювання психофізіологічних станів людини-оператора. Запропоновано методику дослідження психофізіологічного стану людини-оператора. Розглядаються шляхи розробки методу адаптації когнітивних функцій людини-оператора до впливу стресорів.

Табл.: 5. Библиогр.: 18 найм.

UDC 681.518:004.912

**About visual information coding on base of cognitive function identification of human-operator** / A. L. Yerokhin // Bionica intellekta: Sci. Mag. — 2006. — No. 2 (65). — P. 19–26.

The decision of a problem of visual coding information for modelling of psychophysiological states of human-operator is considered. The technique for research of human-operator psychophysiological states is offered. Ways of method development of cognitive functions adaptation of the human-operator to stressors influence are considered.

Tab.: 5. Ref.: 18 items.

---

УДК 519.71

**Реализация некоторых колориметрических преобразований изображений в реальном времени** / В. А. Бобух, Н. В. Павлова // Бионика интеллекта: Научн.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 27–35.

В статье рассматриваются вопросы реализации базовых колориметрических преобразований изображений в реальном времени. Для аппроксимации функций присутствия при микшировании и передаточных характеристик для цветовой коррекции предлагается использовать нейронную сеть СМАС. Приведены структуры микширующего и корректирующего блоков, реализованных с использованием этой сети. Предлагаемый метод обеспечивает сохранение гибкости и универсальности при сокращении объемов передаваемых и хранимых данных по сравнению с табличными методами.

Табл.: 2. Ил.: 6. Библиогр.: 5 назв.

УДК 519.71

**Реалізація деяких колориметричних перетворень зображень у реальному часі** / В. А. Бобух, Н. В. Павлова // Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 27–35.

У статті розглянуто питання реалізації базових колориметричних перетворень зображень у реальному часі. Для апроксимації функцій присутності при міксуванні та передаточних характеристик при кольоровій корекції запропоновано використати нейронну мережу СМАС. Наведено структури міксуючого та коректуючого блоків, що реалізовано з використанням цієї мережі. Запропонований метод забезпечує збереження гнучкості та універсальності при зменшенні обсягів даних, що передаються та зберігаються, у порівнянні з табличними методами.

Табл.: 2. Іл.: 6. Бібліогр.: 5 найм.

UDC 519.71

**Realization of some colorimetric transformations of images in real time** / V. A. Bobukh, N. V. Pavlova // *Bionica intellekta: Sci. Mag.* — 2006. — No. 2 (65). — P. 27–35.

In the article the problems of realization of base colorimetric transformations of images in real time are considered. For approximation of functions of presence for mixing and transfer gains for a color correction it is offered to use neural network СМАС. The structures of mixing and correcting blocks realized with use of this network are indicated. The offered method ensures preservation of flexibility and universality with reduction of volumes of transmitted and stored data on a comparison with look-up table methods.

Tab.: 2. Fig.: 6. Ref.: 5 items.

УДК 519.7

**О решении обратной задачи для линейных логических преобразований** / И. Д. Вечирская // *Бионика интеллекта: Научн.-техн. журнал.* — 2006. — № 2 (65). — С. 36–39.

В статье рассмотрена обратная задача для линейных логических преобразований. Задача решена с помощью метода получения общего решения параметрических уравнений с переменными. Приведен пример решения такой задачи, а также обозначены перспективы применения метода решения для работы логической сети.

Табл.: 1. Библиогр.: 8 назв.

УДК 519.7

**Про розв'язання оберненої задачі для лінійних логічних перетворень** / І. Д. Вечірська // *Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал.* — 2006. — № 2 (65). — С. 36–39.

У статті розглянуто обернену задачу для лінійних логічних перетворень. Задача розв'язана за допомогою методу отримання загального розв'язку параметричних рівнянь зі змінними. Наведено приклад розв'язання такої задачі, а також позначені перспективи застосування методу розв'язання для роботи логічної мережі.

Табл.: 1. Бібліогр.: 8 найм.

UDC 519.7

**About solution of linear logic transformations inverse task** / I. D. Vechirskaya // *Bionica intellekta: Sci. Mag.* — 2006. — No. 2 (65). — P. 36–39.

The inverse problem of linear logic transformations is considered in this paper. This task is settled using method of general solution getting in parameter equations with unknown quantities. An example of the task solution is given. Prospect of solution method application in logic networks is outlined.

Tab.: 1. Ref.: 8 items.

УДК 519.6:621.395.74

**Математическая модель задачи планирования работ в системе поддержки принятия решений** / И. В. Гребенник, А. Ю. Хабаров // *Бионика интеллекта: Научн.-техн. журнал.* — 2006. — № 2 (65). — С. 40–43.

Построена и исследована математическая модель задачи эффективного планирования работ на заданный период как оптимизационной задачи геометрического проектирования. Предлагается метод анализа математической модели. Описывается использование результатов в системе поддержки принятия решений, ориентированной на решение задач развития сетей электросвязи.

Библиогр.: 9 назв.

УДК 519.6:621.395.74

**Математична модель задачі планування робіт в системі підтримки прийняття рішень** / І. В. Гребеннік, О. Ю. Хабаров // *Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал.* — 2006. — № 2 (65). — С. 40–43.

Побудовано та досліджено математичну модель задачі ефективного планування робіт на заданий період як оптимізаційної задачі геометричного проектування. Пропонується метод аналізу математичної моделі. Описується використання результатів у системі підтримки прийняття рішень, орієнтованій на розв'язання задач розвитку мереж електрозв'язку.

Бібліогр.: 9 найм.

UDC 519.6:621.395.74

**Mathematical model for work planning problem in decision making system** / I. V. Grebennik // *Bionica intellekta: Sci. Mag.* — 2006. — No. 2 (65). — P. 40–43.

Mathematical model of effective planning of works problem for given period as optimization problem of geometric design is built and investigated. Method of analysis of mathematical model is proposed. Usage of the results in decision making system in problems of communication network development is considered.

Ref.: 9 items.

---

УДК 004.932.2.001.36:519.7

**Аксиоматическое введение метрики в субъективных пространствах** / С. Н. Герасин, В. В. Шляхов // *Бионика интеллекта: Научн.-техн. журнал.* — 2006. — № 2 (65). — С. 44–48.

В статье рассматриваются свойства предикатов, которые на некотором множестве аксиоматически определяют структуру линейного пространства и позволяют задать метрику в пространстве субъективных образов.

Библиогр.: 6 назв.

УДК 004.932.2.001.36:519.7

**Аксиоматичне введення метрики у суб'єктивних просторах** / С. М. Герасін, В. В. Шляхов // *Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал.* — 2006. — № 2 (65). — С. 44–48.

У статті розглядаються властивості предикатів, які на деякій множині визначають структуру лінійного простору та надають можливість задавати метрику в просторі суб'єктивних образів.

Бібліогр.: 6 найм.

UDC 004.932.2.001.36:519.7

**Axiomatic introduction of birth-certificate is in subjective spaces** / S. N. Gerasin, V. V. Shlyahov // *Bionica intellekta: Sci. Mag.* — 2006. — No. 2 (65). — P. 44–48.

In the article the general properties of many-placed metric predicates are considered which on the Cartesian product of sets set a structure of linear metric space.

Ref.: 6 items.

---

УДК 519.6

**Алгоритм обучения идентификации многомерных объектов** / В. И. Бритик, Е. А. Байдилова // *Бионика интеллекта: Научн.-техн. журнал.* — 2006. — № 2 (65). — С. 49–52.

В статье описывается алгоритм обучения идентификации многомерных объектов. Данный алгоритм состоит из следующих этапов: предварительной обработки исходных данных; грубой классификации исследуемых объектов; реализации механизма оценивания отличительных характеристик объектов, который заключается в определении значений функций принадлежности исследуемых объектов к классам, полученным в результате грубой классификации; построения решающих правил идентификации на основе полученных оценок отличительных характеристик признаков объектов.

Библиогр.: 6 назв.

УДК 519.6

**Алгоритм навчання ідентифікації багатовимірних об'єктів** / В. І. Бритік, Є. О. Байдікова // *Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал.* — 2006. — № 2 (65). — С. 49–52.

У статті описується алгоритм навчання ідентифікації багатовимірних об'єктів. Цей алгоритм складається з таких етапів: попередньої обробки вихідних даних; грубої класифікації об'єктів дослідження; реалізація механізму оцінювання відмітних характеристик об'єктів, що полягає у визначенні значень функцій приналежності об'єктів дослідження до класів, отриманих у результаті грубої класифікації; побудови розв'язувальних правил ідентифікації на основі отриманих оцінок відмітних характеристик ознак об'єктів.

Бібліогр.: 6 найм.

UDC 519.6

**Learning algorithm of identification of multivariate objects** / V. I. Britik, E. A. Baydikova // *Bionica intellekta: Sci. Mag.* — 2006. — No. 2 (65). — P. 49–52.

Given paper is devoted to the training algorithm of multivariate objects identification. The given algorithm consists of the following stages. preliminary data processing; rough classification of studied objects; realizations of the estimation mechanism of objects distinctive characteristics, this mechanism consists in definition of membership functions values of studied objects to the classes, which have been received after rough classification; and a stage of construction of identification decision rule on the basis of the obtained estimations of attributes of objects distinctive characteristics.

Ref.: 6 items.

---

УДК 681.3.06

**Технология построения крупномасштабной базы данных** / С. С. Таянский // Бионика интеллекта: Науч.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 53–56.

Требования современных информационных систем определяют необходимость использования интегрированных баз данных с допущением локальных структурных изменений. В статье рассмотрены основные свойства систем совместной обработки данных и предложена технология построения крупномасштабной базы данных с учетом поддержки глобальной целостности.

Ил.: 6. Библиогр.: 5 назв.

УДК 681.3.06

**Технологія побудови великомасштабної бази даних** / С. С. Таянський // Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 53–56.

Вимоги сучасних інформаційних систем визначають необхідність використання інтегрованих баз даних з допущенням локальних структурних змін. У статті розглянуті основні властивості систем сумісної обробки даних і запропонована технологія побудови великомасштабної бази даних з урахуванням підтримки глобальної цілісності.

Ил.: 6. Библиогр.: 5 найм.

UDC 681.3.06

**Technology of construction of large-scale database** / S. S. Tanyansky // Bionica intellekta: Sci. Mag. — 2006. — No. 2 (65). — P. 53–56.

The requirements of the modern informative systems determine the necessity of the use of the bases integrated data with assumption of local structural changes. In the article basic properties of the systems of the joint processing of data are considered and technology of construction of large-scale database is offered taking into account support of global integrity.

Fig.: 6. Ref.: 5 items.

УДК 621.396.961.1

**Прийняття рішень щодо якості успішності студентів на основі методів розпізнавання образів** / Б. В. Шамша, Т. Б. Шатовська, В. М. Халецький // Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 57–61.

Стаття присвячена аналізу та прогнозуванню якості успішності студентів вузів із використанням дискримінаційного аналізу. Описано модель прогнозування якості навчання студентів з розрахунком апріорних імовірностей і вартості помилкової класифікації. Матеріали статті можуть бути застосовані у вузах для прогнозування кінцевих рівнів навчальних досягнень студентів, проектування планів навчання.

Табл.: 2. Библиогр.: 2 найм.

УДК 621.396.961.1

**Принятие решений по качеству успеваемости студентов на основании методов распознавания образов** / Б. В. Шамша, Т. Б. Шатовская, В. М. Халецкий // Бионика интеллекта: Науч.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 57–61.

Статья посвящена анализу и прогнозированию качества успеваемости студентов вузов с использованием дискриминантного анализа. Описана модель прогнозирования качества обучения студентов с расчетом априорных вероятностей и стоимости ошибочной классификации. Материалы статьи могут быть использованы в вузах для прогнозирования конечных уровней учебных достижений студентов, проектирования планов обучения.

Табл.: 2. Библиогр.: 2 назв.

UDC 621.396.961.1

**Making a decision in quality of progress of students on the basis of identification image data methods** / B. V. Shamsha, T. B. Shatovskaya, V. M. Khaletskiy // Bionica intellekta: Sci. Mag. — 2006. — No. 2 (65). — P. 57–61.

Given article is devoted the analysis and to forecasting of quality of progress of students of HIGH SCHOOLS with use of the discriminant analysis. Aarticle describes model of forecasting of quality training of students with calculation of aprioristic probabilities and cost of erroneous classification. Materials of article can be used in HIGH SCHOOLS for forecasting final levels of educational achievements of students, designing of plans of training.

Tab.: 2. Ref.: 2 items.

УДК 004.032.26

**Вероятностные нейронные сети для решения задач медицинской диагностики** / И. В. Новосельцев, Н. Г. Аксак, О. Ю. Барковская // Бионика интеллекта: Науч.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 62–65.

В работе решается задача классификации изображений на примере медицинской диагностики рака кожи. Построенная экспертная система позволяет: выявить тяжелое заболевание на ранней стадии и провести своевременное лечение; сократить время самой диагностики больных, что является актуальным для данной предметной области; использовать данную систему в телемедицине.

Ил.: 6. Библиогр.: 10 назв.

УДК 004.032.26

**Імовірні нейронні мережі для розв'язання задач медичної діагностики** / І. В. Новосельцев, Н. Г. Аксак, О. Ю. Барковська // Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 62–65.

У роботі розв'язано задачу класифікації зображень на прикладі медичної діагностики раку шкіри. Побудована експертна система дозволяє: виявити важке захворювання на ранній стадії та провести своєчасне лікування; скоротити час самої діагностики хворих, що є актуальним для даної предметної області; використовувати дану систему в телемедицині.

Іл.: 6. Бібліогр.: 10 найм.

UDC 004.032.26

**Probabilistic neural networks for medical diagnostics** / I. V. Novoseltsev, N. G. Axak, O. U. Barkovskaya // Bionica intellekta: Sci. Mag. — 2006. — No. 2 (65). — P. 62–65.

An expert system built in this work allows to: find out a skin disease at early stage and then involve necessary treatment; reduce time for diagnostics of sick people what is really topical for this scientific area; use this system in telemedicine.

Fig.: 6., Ref.: 10 items.

---

УДК 681.3.016

**Представление знаний в системах принятия решений интеллектуальных роботов** / А. М. Цымбал // Бионика интеллекта: Научн.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 66–70.

Рассматриваются вопросы принятия решений в системах управления интеллектуальных роботов, представления знаний в системах принятия решений интеллектуальных роботов на основе логической и фреймовой моделей. Предлагаются варианты формирования баз знаний на основе языка программирования Prolog.

Іл.: 4. Бібліогр.: 5 назв.

УДК 681.3.016

**Подання знань у системах прийняття рішень інтелектуальних роботів** / О. М. Цимбал // Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 66–70.

Розглянуто питання прийняття рішень у системах керування інтелектуальних роботів, подання знань у системах прийняття рішень інтелектуальних роботів на основі логічної та фреймової моделей. Пропонуються варіанти формування баз знань на основі мови програмування Prolog.

Іл.: 4. Бібліогр.: 6 найм.

UDC 681.3.016

**The knowledge representation for intellectual robots problem solving** / A. M. Tsymbal // Bionica intellekta: Sci. Mag. — 2006. — No. 2 (65). — P. 66–70.

There is considered the questions of problem solving for intellectual robots control systems, knowledge representation, applied for intellectual robots problem solving on bases of logical and framework models. The prototypes of knowledge bases forming are proposed on Prolog programming language base.

Fig.: 4. Ref.: 6 items.

---

УДК 519.713

**Модели, методы и средства классификационного моделирования многокритериальных задач принятия решений** / О. А. Нестеренко, Е. Ю. Глубокая, О. Н. Лелеха // Бионика интеллекта: Научн.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 71–76.

Работа посвящена проблеме информационной подготовки многокритериальных задач принятия решений. Для описания многокритериальных альтернатив предложена интегрированная концептуальная классификационная модель, которая позволяет получить объективное описание альтернатив и их существенных свойств. Предложен метод информационной подготовки решений. Проведен анализ отечественных и зарубежных средств классификационного моделирования и предложены требования для создания нового программного инструментария.

Іл.: 2. Бібліогр.: 4 назв.

УДК 519.713

**Моделі, методи та засоби класифікаційного моделювання багатокритеріальних задач прийняття рішень** / О. О. Нестеренко, О. Ю. Глубока, О. Н. Лелеха // Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 71–76.

Роботу присвячено проблемі інформаційної підготовки багатокритеріальних задач прийняття рішень. Для опису багатокритеріальних альтернатив запропоновано інтегровану концептуальну класифікаційну модель, що дозволяє одержати об'єктивний опис альтернатив та їхніх істотних властивостей. Запропоновано метод інформаційної підготовки рішень. Проведено аналіз вітчизняних та закордонних засобів класифікаційного моделювання і запропоновано вимоги для створення нового програмного інструментарію.

Іл.: 2. Бібліогр.: 4 найм.

UDC 519.713

**Models, methods and toolkits for classification modeling of many-criterion decision support problem** / O. A. Nesterenko, E. Y. Glubokaya, O. N. Lepeha // *Bionica intellekta: Sci. Mag.* — 2006. — No. 2 (65). — P. 71–76.

In this work problem of information preparation of many-criterion decision support tasks is developed. Integration conceptual classification model is worked out for operation many-criterion alternatives. The using the model is allowing to decide questions of objective structured and detailed description of alternatives set. Information preparation of many-criterion method is proposed. It is analyzed existing means of classification modeling and the advanced toolkit for classification modeling is offered.

Fig.: 2. Ref.: 4 items.

---

УДК 681.3

**Каркас построения МАНОК-систем** / А. Ф. Манако // *Бионика интеллекта: Научн.-техн. журнал.* — 2006. — № 2 (65). — С. 77–82.

Предложен каркас построения МАНОК-систем в виде аксиоматического описания концептов абстрактной МАНОК-системы  $\hat{S}$  (слабоструктурированная  $\hat{S}$ , замкнутая слабоструктурированная  $\hat{S}$ , элементарная  $\hat{S}$ ,  $\hat{S}^{22}$  — логически связанная элементарная  $\hat{S}$ ).

Ил.: 8. Библиогр.: 9 назв.

УДК 681.3

**Каркас побудови МАНОК-систем** / А. Ф. Манако // *Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал.* — 2006. — № 2 (65). — С. 77–82.

Запропоновано каркас побудови МАНОК-систем у вигляді аксіоматичного опису концептів абстрактної МАНОК-системи  $\hat{S}$  (слабоструктурована  $\hat{S}$ , замкнена слабоструктурована  $\hat{S}$ , елементарна  $\hat{S}$ ,  $\hat{S}^{22}$  — логічно зв'язана елементарна  $\hat{S}$ ).

Ил.: 8. Библиогр.: 9 найм.

UDC 681.3

**MANOK-system building framework** / A. F. Manako // *Bionica intellekta: Sci. Mag.* — 2006. — No. 2 (65). — P. 77–82.

The MANOK-system building framework is described.

Fig.: 8. Ref.: 9 items.

---

УДК 615.47

**Выбор метода сегментации костных структур на томографических изображениях** / Е. О. Шамраева, О. Г. Аврунин // *Бионика интеллекта: Научн.-техн. журнал.* — 2006. — № 2 (65). — С. 83–87.

Работа посвящена проектированию алгоритма сегментации структур черепа на КТ-изображениях. Описан комплексный метод сегментации структур черепа, включающий предварительную обработку, сегментацию и постобработку изображений томографических срезов.

Ил.: 5. Библиогр.: 11 назв.

УДК 615.47

**Вибір методу сегментації кісткових структур на томографічних зображеннях** / О. О. Шамраєва, О. Г. Аврунін // *Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал.* — 2006. — № 2 (65). — С. 83–87.

Робота присвячена проектуванню алгоритму сегментації структур черепа на КТ-зображеннях. Описаний комплексний метод сегментації структур черепа, що включає попередню обробку, сегментацію і постобробку зображень зрізів томограм.

Ил.: 5. Библиогр.: 11 найм.

UDC 615.47

**Choice of method of segmentation of bone structures on the CT-images** / L. O. Shamraeva, O. G. Avrunin // *Bionica intellekta: Sci. Mag.* — 2006. — No. 2 (65). — P. 83–87.

The work is devoted to design segmentation algorithm for cranium structures on CT-images. Complex method for segmentation of cranium structures with pre- and post- image processing procedures is described.

Fig.: 5. Ref.: 11 items.

---

УДК 621.396.961.1

**Метод определения границ изолированного слова в речевом сигнале** / Е. Е. Федоров // *Бионика интеллекта: Научн.-техн. журнал.* — 2006. — № 2 (65). — С. 88–91.

Для создания аппаратно-программной части естественно-языкового интерфейса распознавания специализированных команд интеллектуальной системы управления разработан метод определения границ речи изолированного слова, учитывающий шумы аппаратной части и параметры речи диктора.

Табл.: 2. Ил.: 4. Библиогр.: 7 назв.

УДК 621.396.961.1

**Метод визначення границь ізольованого слова в мовному сигналі** / Є. Є. Федоров // Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 88–91.

Для створення апаратно-програмної частини природно-мовного інтерфейсу розпізнавання спеціалізованих команд інтелектуальної системи керування розроблено метод визначення границь мови ізольованого слова, що враховує шуми апаратної частини і параметри мови диктора.

Табл.: 2. Іл.: 4. Бібліогр.: 7 найм.

UDC 621.396.961.1

**Method of determination of an insulated word in a voice signal** / Ye. Fedorov // Bionica intellekta: Sci. Mag. — 2006. — No. 2 (65). — P. 88–91.

For creation of a hardware-software part of the natural language interface of recognition of specialized commands of an intellectual control system the method of determination of speech of an insulated word is designed, which one allows for noise of the hardware and parameters of speech of the speaker.

Tab.: 2. Fig.: 4. Ref.: 7 items.

---

УДК 004.93:007.52

**Методи параметрической идентификации неоднородных моделей фармакодинамики** / С. М. Герасин, Н. В. Гибкина // Бионика интеллекта: Научн.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 92–96.

Рассмотрены многокамерные неоднородные модели кинетики лекарственных препаратов в организме. Предложены методы параметрической идентификации параметров моделей. Разработан метод расчета оптимальной концентрации лекарственных веществ в соответствующих органах.

Ил.: 1. Библиогр.: 8 назв.

УДК 004.93:007.52

**Методи параметричної ідентифікації неоднорідних моделей фармакодинаміки** / С. М. Герасін, Н. В. Гібкіна // Біоніка інтелекту: Наук.-техн. журнал. — 2006. — № 2 (65). — С. 92–96.

Розглянуто багатокammerні неоднорідні моделі кінетики лікарських препаратів в організмі. Запропоновано методи параметричної ідентифікації параметрів моделей. Розроблено метод розрахунку оптимальної концентрації лікарських речовин у відповідних органах.

Іл.: 1. Бібліогр.: 8 найм.

UDC 004.93:007.52

**Methods of self-reactance authentication of inhomogeneous models of pharmacodynamics** / S. N. Gerasin, N. V. Gibkina // Bionica intellekta: Sci. Mag. — 2006. — No. 2 (65). — P. 92–96.

The multicamerate inhomogeneous models of kinetics of medicinal preparations are considered in an organism. The methods of self-reactance authentication of parameters of models are offered. The method of calculation of optimum concentration of medicinal matters is developed in the proper organs.

Fig.: 1. Ref.: 8 items.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аврунин Олег Григорьевич	канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры БМЭ, ХНУРЭ
Аксак Наталия Георгиевна	канд. техн. наук, доцент кафедры ЭВМ, ХНУРЭ
Байдикова Евгения Александровна	аспирант кафедры информатики, ХНУРЭ
Барковская Олеся Юрьевна	аспирант кафедры ЭВМ, ХНУРЭ
Бескорвайный Владимир Валентинович	д-р техн. наук, профессор кафедры системотехники, ХНУРЭ
Бобух Всеволод Анатольевич	аспирант кафедры ЭВМ, ХНУРЭ
Бритик Владимир Иванович	канд. техн. наук, доцент кафедры информатики, ХНУРЭ
Вечирская Ирина Дмитриевна	инженер I категории, аспирант кафедры программного обеспечения ЭВМ, ХНУРЭ
Герасин Сергей Николаевич	д-р техн. наук, профессор кафедры высшей математики, ХНУРЭ
Гибкина Надежда Валентиновна	канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры прикладной математики, ХНУРЭ
Глубокая Елена Юрьевна	студентка гр. ПОАС-02-4, ХНУРЭ
Гребенник Игорь Валериевич	канд. физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры системотехники, ХНУРЭ
Ерохин Андрей Леонидович	канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры информатики Харьковского национального университета внутренних дел
Ефимова Ирина Александровна	аспирант кафедр программного обеспечения ЭВМ, и. о. ассистента кафедры программного обеспечения ЭВМ, ХНУРЭ
Ленеха Ольга Николаевна	студентка гр. ПОАС-02-4, ХНУРЭ
Лещинский Владимир Александрович	ассистент кафедры программного обеспечения ЭВМ, ХНУРЭ
Манако Алла Федоровна	канд. техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины
Нестеренко Оксана Алексеевна	канд. техн. наук, доцент кафедры программного обеспечения ЭВМ, ХНУРЭ
Новосельцев Игорь Валерьевич	аспирант кафедры ЭВМ, ХНУРЭ
Островерхая Наталья Николаевна	ведущий инженер Центра обучения студентов на иностранных языках, ХНУРЭ
Островерхий Алексей Викторович	аспирант кафедры ЭВМ, ХНУРЭ
Павлова Наталья Витальевна	студентка факультета ЭА, ХНУРЭ
Петров Эдуард Георгиевич	д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой системотехники, ХНУРЭ
Руденко Олег Григорьевич	д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ЭВМ, ХНУРЭ
Ружицкий Антон Валерьевич	студент группы ТСС-03-1, ХНУРЭ
Тавянский Сергей Станиславович	канд. техн. наук, доцент кафедры ЭВМ, ХНУРЭ
Токарев Владимир Владимирович	канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры ЭВМ, ХНУРЭ
Трофименко Инна Владимировна	мл. науч. сотр. кафедры системотехники, ХНУРЭ
Федоров Евгений Евгеньевич	канд. техн. наук, доцент кафедры «Системный анализ и моделирование» Донецкого государственного института искусственного интеллекта
Цимбал Александр Михайлович	канд. техн. наук, докторант кафедры технологии и автоматизации производства, ХНУРЭ
Хабаров Александр Юрьевич	канд. техн. наук, научный сотрудник производственно-коммерческой фирмы «РиКо»
Халецкий Владислав Николаевич	студент гр. ИУСТм-06-1, ХНУРЭ
Четвериков Григорий Григорьевич	д-р техн. наук, профессор кафедры программного обеспечения ЭВМ, ХНУРЭ
Шамраева Елена Олеговна	аспирант кафедры БМЭ, ХНУРЭ
Шамша Борис Владимирович	канд. техн. наук, профессор, преподаватель кафедры ИУС, ХНУРЭ
Шатовская Татьяна Борисовна	доцент кафедры ПОАС, ХНУРЭ
Шляхов Владислав Викторович	канд. техн. наук, доцент, вед. науч. сотр. кафедры информатики, ХНУРЭ

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ РУКОПИСІВ для авторів науково-технічного журналу «БІОНІКА ІНТЕЛЕКТУ»

Науково-технічний журнал «Біоніка інтелекту» приймає до друку написані спеціально для нього оригінальні рукописи, які раніше ніде не друкувалися. Структура рукопису повинна бути такою: індекс УДК, заголовок, відомості про авторів, анотація, ключові слова, вступ, основний текст статті, висновки, список використаної літератури.

Відповідно до Постанови ВАК України від 15.01.2003 № 7-05/1 (Бюлетень ВАК, № 1, 2003, с. 2), стаття повинна мати такі необхідні елементи: постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми в даній галузі; формулювання цілей та завдань дослідження; виклад основного матеріалу досліджень із повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки за роботою та перспективи подальших досліджень у цьому напрямку.

Статті повинні бути виконані в редакторі Microsoft Word. Формат сторінки — А4 (210×297 мм), поля: верхнє — 25 мм, нижнє — 20 мм, лівє, правє — 17 мм. Кількість колонок — 2, з інтервалом між ними 5 мм, основний шрифт Times New Roman, кегль основного тексту — 10 пунктів, міжрядковий інтервал — множник (1,1), абзацний відступ — 6 мм. Обсяг рукопису — від 4 до 12 аркушів (мови: російська, українська, англійська).

*УДК* друкується з першого рядка, без відступів, вирівнювання — по лівому краю. *Назва статті* друкується прописними літерами; шрифт прямий, напівжирний, кегль 12. *Назви розділів* нумерують арабськими цифрами, виділяють жирним шрифтом. Відступи для назви статті, ініціалів і прізвищ авторів, відомостей про авторів, назв розділів, вступу та висновків, списку літератури: зверху — 6 пт, знизу — 3 пт.

*Анотацію* (мовою статті, абзац 4–10 рядків, кегль 9) розміщують на початку статті, вона повинна містити інформацію про результати описаних досліджень.

*Ключові слова* (4–10 слів із тексту статті, які з точки зору інформаційного пошуку несуть змістове навантаження) наводять мовою рукопису, через кому в називному відмінку, кегль 9.

*Малюнки та таблиці* (чорно-білі, контрастні) розміщують у тексті після першого посилання у вигляді окремих об'єктів і нумерують арабськими цифрами наскрізно нумерацією при наявності більше ніж одного об'єкта. Невеликі схеми, що складаються з 3–4 елементів, рисують, використовуючи вставку об'єкта Рисунок Microsoft Word. Більш складні виконують у графічних редакторах у вигляді чорно-білих графічних файлів форматів .tiff, .jpeg, .wmf, .cdr із розділенням 300 dpi. Рисунки мають міститися у текстовому файлі й обов'язково подаватися окремим файлом з відповідною назвою (наприклад, Рис.1.cdr).

Усі елементи малюнка, включаючи написи, повинні бути згруповані. Усі написи в малюнках і таблицях мають бути виконані шрифтом Times New Roman, кегль у малюнках — 10, у таблицях — 9.

Малюнок повинен мати центрований підпис (поза малюнком), кегль 9, відступи зверху і знизу по 6 пт. Ширина малюнка має відповідати ширині колонки або ширині сторінки.

*Формули, символи, змінні* повинні бути набрані в редакторі формул MathType або Microsoft Equation. Формули розміщують посередині рядка й нумерують за наявності посилань на них у рукописі. Шрифт — Times New Roman. Висота змінної — 10 пт, великих і малих індексів — 8 пт, основний математичний символ — 12 (10) пт. Змінні, які позначені латинськими літерами, набирають курсивом, грецькі літери, скорочення російських слів і цифри — прямим написанням. Змінні, які є в тексті, також набирають у редакторі формул.

*Список літератури* містить опубліковані джерела, на які є посилання в тексті, укладені у квадратні дужки, друкують без абзацного відступу, кегль — 9 пт, відступ зверху — 6 пт.

Після списку літератури з відступом зверху 6 пт зазначають дату подання статті до редколегії. Число та місяць задають двозначними числами через крапку. Розмір шрифта — 9 пт, курсив, вирівнювання по правому краю.

*Реферати* (Times New Roman, кегль — 9 пт, 3–4 речення) подають російською та англійською мовами.

Разом із рукописом (на аркушах білого паперу формату А4 щільністю 80–90 г/м<sup>2</sup>, надрукованим на лазерному принтері, у 2-х примірниках) необхідно подати такі документи:

1. Заяву за наведеним зразком, яку повинні підписати всі автори:

«Прошу прийняти статтю ... (зазначити прізвища авторів, назву статті) обсягом ... сторінок (указати кількість сторінок) для опублікування в науково-технічному журналі «Біоніка інтелекту». Оплату гарантуємо.

Відомості про авторів: ... (указати прізвище, ім'я та по батькові, місце роботи, вчений ступінь, наукове звання, контактний телефон, поштову та електронну адресу).

Підписи авторів».

2. Акт експертизи про можливість опублікування матеріалів у відкритому друку.

3. Рецензію, підписану доктором наук.

4. Відомості про авторів.

5. Електронний варіант (на дискеті 3,5" або електронною поштою) рукопису, реферату та відомостей про авторів.

6. Оплата за публікацію.

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ для авторов научно-технического журнала «БИОНИКА ИНТЕЛЛЕКТА»

Научно-технический журнал «Бионика интеллекта» принимает для опубликования написанные специально для него оригинальные рукописи, которые нигде раньше не издавались. Структура рукописи должна быть следующей: индекс УДК, заглавие, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, введение, основной текст статьи, выводы, список использованной литературы.

Согласно Постановлению ВАК Украины от 15.01.2003 № 7-05/1 (Бюллетень ВАК, № 1, 2003, с. 2), статья должна иметь следующие необходимые элементы: постановку проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими заданиями; анализ последних исследований, публикаций и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы в данной области; формулирование целей и задач исследования; изложение основного материала исследований с полным обоснованием полученных научных результатов; выводы по данному исследованию и перспективы дальнейших исследований в данном направлении.

Статьи должны быть выполнены в редакторе Microsoft Word. Формат страницы — А4 (210×297 мм), поля: верхнее — 25 мм, нижнее — 20 мм, левое, правое — 17 мм. Количество колонок — 2, с интервалом между ними 5 мм, основной шрифт Times New Roman, кегль основного текста — 10 пунктов, междустрочный интервал — множитель (1.1), абзацный отступ — 6 мм. Объем рукописи — от 4 до 12 листов (языки: русский, украинский, английский).

УДК печатается с первой строки, без отступа, выравнивание по левому краю. Название рукописи печатается прописными буквами; шрифт прямой, полужирный, кегль 12. Названия разделов нумеруют арабскими цифрами, выделяют жирным шрифтом. Отступы для названия рукописи, инициалов и фамилий авторов, сведений об авторах, названий разделов, введения и выводов, списка литературы сверху — 6 пт, снизу — 3 пт.

Аннотация (на языке рукописи, абзац 4–10 строк, кегль 9) помещается в начале статьи и содержит информацию о результатах описанных исследований.

Ключевые слова (4–10 слов из текста статьи, которые с точки зрения информационного поиска несут смысловую нагрузку, на языке рукописи, через запятую в именительном падеже, кегль 9).

Рисунки и таблицы (черно-белые, контрастные) помещаются в текст после первой ссылки в виде встроенных объектов и нумеруются арабскими цифрами сквозной нумерацией при наличии более одного объекта. Простые схемы, состоящие из 3–4 элементов, рисуют, используя вставку объекта Рисунок Microsoft Word. Более сложные выполняют в графических редакторах в виде черно-белых графических файлов форматов .tiff, .jpeg, .wmf, .cdr с разрешением 300 dpi. Рисунки должны быть включены в текстовый файл, а также обязательно представлены отдельным файлом с соответствующим названием (например, Рис.1.cdr).

Все элементы рисунка, включая надписи, должны быть сгруппированы. Все надписи в рисунках и табли-

цах должны быть выполнены шрифтом Times New Roman, кегль в рисунках — 10, в таблицах — 9. Табличный заголовок располагается справа над таблицей (кегль 9 пт).

Рисунок содержит подрисовочную центрированную подпись (вне рисунка), кегль 9, по центру, отступы сверху и снизу по 6 пт. Ширина рисунка должна соответствовать ширине колонки (или ширине страницы).

Формулы, символы, переменные, должны быть набраны в редакторе формул MathType или Microsoft Equation. Формулы располагаются по центру и нумеруются при наличии ссылок на них в рукописи. Шрифт — Times New Roman. Высота переменной — 10 пт, индексов и подиндексов — 8 пт, основной математический символ — 12 (10) пт. Переменные, обозначенные латинскими буквами, набирают курсивом, греческие буквы, сокращения русских слов и цифры — прямым начертанием. Переменные, содержащиеся в тексте, также набирают в редакторе формул. Небольшие формулы можно размещать не в отдельной строке, а прямо по тексту.

Список литературы включает опубликованные источники, на которые имеются ссылки в тексте, заключенные в квадратные скобки, печатается без абзацного отступа, кегль 9 пт, отступ сверху — 6 пт.

После списка литературы с отступом сверху 6 пт указывается дата поступления статьи в редколлегию. Число и месяц задаются двузначными числами через точку. Размер шрифта — 9 пт, курсив, выравнивание по правому краю.

Рефераты (Times New Roman, кегль — 9 пт, 3–4 предложения) на украинском и английском языках.

Вместе с рукописью (на листах белой бумаги формата А4 плотностью 80–90 г/м<sup>2</sup>, напечатанный на лазерном принтере, в 2-х экземплярах) необходимо подать следующие документы:

1. Заявку утвержденного образца, подписанную всеми авторами:

«Прошу принять статью ... (указать фамилии авторов, название статьи) объемом ... страниц (указать количество страниц) для опубликования в научно-техническом журнале «Бионика интеллекта». Оплату гарантируем.

Сведения об авторах: ... (указать фамилию, имя, отчество каждого автора, место работы, ученую степень, научное звание, контактный телефон, почтовый и электронный адреса).

Подписи авторов».

2. Акт экспертизы о возможности опубликования материалов в открытой печати.

3. Рецензию, подписанную доктором наук.

4. Сведения об авторах.

5. Электронный вариант (на дискете 3,5" или электронной почтой) рукописи, реферата и сведений об авторах.

6. Оплата за публикацию.

---

## INSTRUCTIONS FOR AUTHORS OF MANUSCRIPTS of the scientific journal «BIONICS of INTELLIGENCE»

---

The scientific journal «Bionics of intelligence» accepts for publication original manuscripts which have not been published earlier. The manuscript structure should be as follows: Universal Decimal Classification (UDC) title, authors' initials and surname (in alphabetical order), abstract, key words, introduction, main text, conclusions, references.

According to the Editorial board resolution, based on the Presidium Convention of Ukraine's Supreme Attestation Committee of 15.01.2003 № 7-05/1 (Bulletin of Supreme Attestation Committee, № 1, 2003, p. 2) manuscripts must have the following required elements: introduction (general statement of a problem and its relation to important scientific and practical tasks; analysis of recent research, publications and highlighting of unsolved parts of the general problem in the given field); formulating aims and tasks of research; presentations of the main research material with full substantiation of scientific results obtained; conclusions and perspectives of further research in the given field.

Manuscripts should be submitted in Microsoft Word. Page format — A4 (210x297 mm), margins: top — 25 mm, bottom — 20 mm; left, right — 17 mm. Double column format with 5 mm spacing, font — Times New Roman, font size — 10 points, line spacing — multiplier (1.1), indentation — 6 mm. The manuscript should be from 4 to 12 pages (languages: Russian, Ukrainian, English).

The UDC is published from the first line, without indentation, the alignment is by a left edge. The title is in capital letters; the type is medium bold-faced Roman; type size 12. The names of sections are of extra bold type and numbered in Arabic figures. There are indentions for the names of manuscripts, initials and surnames of authors, information about authors, the names of sections, introduction and conclusions, references: top — 6 pt; bottom — 3 pt.

An abstract (in the language of a manuscript, an indentation is made up of 4–10 lines; type 9) is in the beginning of an article and contains information about the results of described studies.

Key words (4–10 words from the text of an article, which from the point of view of information search bear sense in the language of a manuscript, by way of a comma in nominative case, type 9).

Figures and tables (black-and-white, sharp and of good quality) should be in a text after a first reference in the form of embedded item and numbered separately by Arabic numerals in case of more than one item. All legends of figures and tables, including inscriptions, must be grouped. All inscriptions in figures and tables must be in Times New Roman, font size in figures — 10,

in tables — 9. A table title is to the right above the table (font size — 9). The figure should contain a centered figure legend (outside a figure), font size 9, in the centre, top and bottom indentions — 6 pt. The figure width must agree with the column width (or page width).

Equations, symbols, variables should be submitted in Math Type or Microsoft Equation. Equations are centered and numbered in case of references in the text. The font — Times New Roman. The size of variable — 10 points, superscript and subscript characters — 8 pt, a main math. symbol — 12 (10) pt. Variables, designated by Latin letters, should be italicized; Greek letters, abbreviations of Russians words and figures should be set in Roman type. Variables which are in the text are also submitted in Math Type or Microsoft Equation.

References, submitted to the state standards, include published sources that are referred to in the main text in square brackets, without an indentations, 9 pt, top indentation — 6 pt.

The date of receiving an article by the Editorial board is designated after the references with top indentations — 6pt. Date and month should be given in numbers by way of a full stop. The font size — 9 pt, italic type, alignment should be done on the right edge.

Abstracts should be submitted in two languages: Ukrainian and Russian (Times New Roman, 9 pt, 3–4 sentences).

The following documents must be submitted together with a manuscript on A4 format white color sheets of 80–90 g/m<sup>2</sup> density typed on a laser printer:

1. An application of the following form signed by all the authors:

«You are kindly requested to accept the paper (authors' full names and the name of an paper should be indicated) in ..... pages (the number of pages should be indicated) for publication in the scientific journal «Bionics of intelligence». We guarantee the payment.

Information about the authors (surname, first name and patronimic of each authors, place of work, degree, academic status, contact telephone, mailing and electronic addresses should be indicated).

Signatures of authors».

2. A certificate of expertise about a possibility of having the materials published in the press.

3. A review signed by a doctor of sciences.

4. Information about the authors.

5. An electronic variant of a manuscript, an abstract and information about the authors (on a 3.5" diskette or by electronic mail).

6. A receipt of payment for publication.

## АЛГЕБРО-ЛОГІЧНІ ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИРОДНОЇ МОВИ

Г. Г. Четвериков<sup>1</sup>, І. Д. Вечірська<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ХНУРЕ, м. Харків, Україна, chetvergg@kture.kharkov.ua;

<sup>2</sup>ХНУРЕ, м. Харків, Україна, ira\_se@list.ru

Проведено аналіз алгебро-логічної структури природної мови. Розглянуто концептуально-методологічний підхід до мови людини, що дозволяє сприймати її як деяку алгебру, а її тексти — як формули цієї алгебри.

МОВА ПРИРОДНА, АЛГЕБРА ПРЕДИКАТІВ, ВІДНОШЕННЯ, АЛГЕБРА ПРЕДИКАТНИХ ОПЕРАЦІЙ.

### Вступ

Формальним моделям семантико-синтаксичних структур мови відводиться вирішальна роль у сучасній проблематиці комп'ютерної лінгвістики та системах штучного інтелекту (ШІ). Це пов'язано з необхідністю створення програмно-апаратного комплексу генерації та аналізу речень природної мови (ПМ).

### 1. Дослідження алгебро-логічної структури природної мови

У роботі використовується апарат алгебри предикатів [1]. Множина  $U$  може бути як скінченною, так нескінченною. У першому випадку простір  $U^m$  називатимемо скінченим, а в іншому — нескінченим.

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } (x_1, x_2, \dots, x_n) \notin T, \\ 1, & \text{якщо } (x_1, x_2, \dots, x_n) \in T. \end{cases} \quad (1)$$

Згідно з (1) можливий перехід від будь-якого відношення  $T$  до відповідного йому предиката  $P$ . Предикат  $P$ , що знаходимо за (1), називатимемо характеристичною функцією відношення  $T$ .

### 2. Шляхи автоматизації обробки мовної інформації

На цей час у системах штучного інтелекту машинний словник та комплекс програм (тезаури) використовуються, як правило, для виконання будь-якої однієї функції.

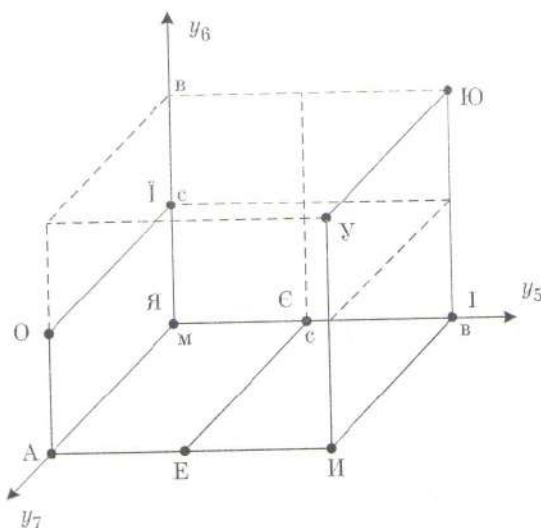


Рис. 1. Тривимірний простір ознак для голосних фонем

### Висновки

У статті запропоновано узагальнену структуру інтелектуальної системи, яка відповідає новій інформаційній технології розв'язання задач на ЕОМ, що орієнтовані на досягнення високорівневої технології обробки мовної інформації (отримання нової якості). Істотно новим у роботі є розширення алгебри скінчених предикатів (АСП). Тепер вона охоплює не тільки скінченні, а й нескінченні предикати. Галузь її рекомендованого застосування розширена й охоплює довільні відношення, які далі описуватимемо за допомогою АСП.

**Список літератури:** 1. Бондаренко М. Ф., Шабанов-Кушнарєнко Ю. П. О бонике интеллекта // Бионика интеллекта. — 2004. — Вып. 1(61). — С. 3–14. 2. Бондаренко М. Ф., Коноплянко З. Д., Четвериков Г. Г. Основы теории синтеза надшвидкодійних структур мовних систем штучного інтелекту. — К.: ІЗМН. 1997. — 264 с.

Надійшла до редколегії 15.02.2007

УДК 519.62

Алгебро-логические средства моделирования естественного языка / Г.Г. Четвериков, И.Д. Вечирская // Бионика интеллекта: Науч.-техн. журнал. — 2007. — №1 (66). — С. 00-00.

В статье рассматриваются перспективные направления развития современных цифровых устройств, сетей и систем. Утверждается, что развитие средств вычислительной техники является основой автоматизации умственной деятельности человека.

Ил.: 5. Библиогр.: 7 назв.

UDK 519.62

Algebra-logical tools of modeling natural language / G. G. Chetverikov, I. D. Vechirskaya // Bionics of Intelligence: Sci. Mag. — 2007. — № 1(66). — P. 00–00.

In article the perspective directions of modern digital devices, networks and systems development are considered. The carried out analysis shows means of computer facilities development is a baseline of automation of the man intellectual activity.

Fig.: 5. Ref.: 7 items.

Просимо надати короткі біографічні дані (до 20 рядків) та скановані фотографії кожного з авторів. Видавництво здійснює остаточне форматування тексту відповідно вимогам друку.

Адреса редакції: Україна, 61726, м. Харків, пр. Леніна 14, ХНУРЕ, к. 285, 437; тел. 702-13-97, факс 702-15-15; e-mail: bionics@kture.kharkov.ua; innov1@kture.kharkov.ua.

---

---

## ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА:

- алгебро-логические системы
- базы знаний
- генная инженерия
- игры и машинное творчество
- иерархические и динамические системы
- интеллектуальные агенты
- интеллектуальные роботы
- интеллектуальные сети
- лингвистические технологии
- математическая психология
- машинное обучение и эволюция
- методология информатизации
- мозгоподобные ЭВМ
- нейроматематика
- объектное моделирование
- онтологические системы
- параллельная обработка информации
- поиск информации
- понимание
- принятие решений
- распознавание и синтез речи
- распознавание образов
- теория интеллекта
- философия информатизации
- чувственное восприятие
- экспертные системы
- электронная нервная система

### Адрес редакции:

Украина, 61166, Харьков-166, пр. Ленина, 14, к. 139  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники (ХНУРЭ),  
тел. 702-13-07, e-mail: bionics@kture.kharkov.ua, innov1@kture.kharkov.ua

---

---

Науковий редактор — *Ю. П. Шабанов-Кушнарєнко*

Редактор — *Л. В. Ситнік*

Відповідальний за випуск — *Г. Г. Четвериков*

Комп'ютерна верстка — *І. Г. П'ятигорська*

Рекомендовано Вченою Радою

Харківського національного університету радіоелектроніки  
(протокол № 28 від 29.12.2006)

Підписано до друку 29.12.2006. Формат 60 × 84 1/8. Друк ризографічний.

Папір офсетний. Гарнітура New Standard. Умов. друк. арк. 12,79. Обл.-вид. арк. 15,1. Тираж 300 прим. Зам. № 60

ТОВ «Компанія СМІТ»

61166, м. Харків, просп. Леніна, 14

Тел.: 8 (057) 717-54-94. Факс: 8 (057) 702-13-07

E-mail: book@smit.com.ua

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи

до Державного реєстру видавців, виготівників

і розповсюджувачів видавничої продукції

ДК № 26.04.2001

Друк — ФОП Васильєва Н. В.

м. Харків, просп. Леніна, 14

тел. 8 (057) 702-13-07