

### Раздел III. Методы искусственного интеллекта

УДК 519.71

Д.В. Акулов

#### ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА ПРИ ВЕРБАЛЬНОМ ОПИСАНИИ СИТУАЦИЙ

При эксплуатации энергетических объектов возможно появление, так называемых, нестандартных ситуаций, которые характеризуются тем, что параметры могут находиться в зонах предельных значений, а вывод о принятии управляющих решений не может быть формально определен. То есть появляются ситуации, в которых математические модели аналитического вида не могут быть применены. В этих ситуациях эффективное принятие решений может быть осуществлено с применением методов искусственного интеллекта. Рассмотрим эти модели.

Так как подавляющее большинство параметров объекта управления могут быть заданы на вербальном уровне, то напрашивается вывод о целесообразности применения ситуационной модели принятия решения о найме конкретного претендента из множества претендентов. Рассмотрим суть ситуационной модели [1, 2, 3].

Принятие решений в данной модели осуществляется по данным анализа близости реальной ситуации к одной из множества эталонных нечетких ситуаций.

Под реальной ситуацией (состоянием) в данной модели понимается совокупность нечетких компонент вектора конструктивных параметров состояния объекта управления. Множество эталонных нечетких ситуаций задается экспертами исходя из анализа множества принятия решений.

Задача принятия решения сводится к сопоставлению реального состояния объекта с эталонными состояниями, к выявлению наиболее близкой эталонной ситуации, а затем к принятию решения об управлении в соответствии с наиболее близкой эталонной ситуацией.

Аналогичным образом экспертами могут быть заданы нечеткие множества второго уровня, определяющие реальные нечеткие состояния работодателя и рабочего места.

Для определения близости реальных нечетких состояний  $\tilde{S}_i$  объекта управления и нечеткой эталонной ситуации  $\tilde{S}_j^*$  необходимо применить из нечеткой логики такие операции, как определение степени включения, определение степени нечеткого равенства, определение степени нечеткой эквиваленции. Понятие степени включения, степени нечеткого равенства, степени нечеткой общности нечеткого реального состояния и нечеткого эталонного состояния базируется на определении степени включения нечетких множеств [2]. В общем случае степень включения нечеткого реального состояния  $\tilde{S}_i$  в нечеткое эталонное состояние  $\tilde{S}_j^*$  определится выражением

$$v(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j^*) = \&_{x \in X} v(\mu_{S_i}(x), \mu_{S_j^*}(x)), \quad (1)$$

где степень включения нечеткого множества  $\tilde{S}_i$  в нечеткое множество  $\tilde{S}_j^*$  определится по формуле

$$v(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j^*) = \&_{x \in X} (\mu_{\tilde{S}_i}(x) \otimes \mu_{\tilde{S}_j^*}(x)), \quad \tilde{S}_i \rightarrow \tilde{S}_j^* = \max(1 - \tilde{S}_i, \tilde{S}_j^*).$$

Для общего случая степень нечеткого равенства нечеткого реального состояния  $\tilde{S}_i$  и нечеткого эталонного состояния  $\tilde{S}_j^*$  определится выражением [2]:

$$\mu(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j^*) = v(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j^*) \& v(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j^*). \quad (2)$$

Считается, что нечеткое реальное состояние  $\tilde{S}_i$  нечетко равно нечеткому эталонному состоянию  $\tilde{S}_j^*$ , если  $\mu(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j^*) \geq t$ , где, например,  $t \in [0, 6; 1]$  – порог нечеткого равенства состояний.

Степень нечеткого равенства нечеткого реального состояния  $\tilde{S}_i$  и нечеткого эталонного состояния  $\tilde{S}_j^*$  также определится выражением

$$\mu(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j^*) = \&_{x \in X} \mu(\mu_{S_i}(x), \mu_{S_j^*}(x)),$$

где

$$\mu(\mu_{S_i}(x), \mu_{S_j^*}(x)) = \&_{T_k^i \in T_k} C(\mu_{\mu_{S_i}(x)}(T_k^i), \mu_{\mu_{S_j^*}(x)}(T_k^i)), \quad (3)$$

где  $T_k = \{T_k^1, T_k^2, \dots, T_k^{\alpha_k}\}$  – терм-множество ЛП  $\alpha_k$ , причем возможны два следующих варианта определения:  $C(\mu_{\mu_{S_i}(x)}(T_k^i), \mu_{\mu_{S_j^*}(x)}(T_k^i))$ :

$$\text{а) } C(\mu_{\mu_{S_i}(x)}(T_k^i), \mu_{\mu_{S_j^*}(x)}(T_k^i)) = \mu_{\mu_{S_i}(x)}(T_k^i) \leftrightarrow \mu_{\mu_{S_j^*}(x)}(T_k^i); \quad (4a)$$

если  $\mu_{\mu_{S_i}(x)}(T_k^i) \notin (1-t, t)$  и  $\mu_{\mu_{S_j^*}(x)}(T_k^i) \notin (1-t, t)$ ;

$$\text{б) } 1, \text{ если } \mu_{\mu_{S_i}(x)}(T_k^i) \notin (1-t, t) \text{ или } \mu_{\mu_{S_j^*}(x)}(T_k^i) \in (1-t, t). \quad (4б)$$

Операции нечеткой эквивалентности определится формулой [2]:

$$\tilde{S}_i \leftrightarrow \tilde{S}_j^* = \min\{\max(1 - \tilde{S}_i, \tilde{S}_j^*), \max(1 - \tilde{S}_j^*, \tilde{S}_i)\}.$$

Возможно событие, при котором рассматриваемые реальные нечеткие состояния  $\tilde{S}_i$  нечетко неравны эталонному нечеткому состоянию  $\tilde{S}_j^*$ , т.е.

$\forall i \mu(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j^*) < t$ . Тогда определяют для каждого реального нечеткого состояния  $\tilde{S}_i$  степень близости к нечеткому эталонному состоянию  $\tilde{S}_j^*$ . Близость нечетких состояний оценивается исходя из значения степени нечеткой общности состояний.

Известно определение [2], что нечеткой  $(n-q)$ -общностью ситуаций называется такое сходство ситуаций, когда нечеткие значения всех признаков в ситуациях нечетко равны, кроме нечетких значений не более чем  $q$  признаков ( $n$  – об-

шее число признаков). Степень  $(n-q)$ -общности  $\chi_{n-q}(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j^*)$  нечеткого реального состояния  $\tilde{S}_i$  и нечеткого эталонного состояния  $\tilde{S}_j^*$  определим выражением

$$\chi_{n-q}(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j^*) = \&_{x \in X_q} \mu(\mu_{S_i}(x), \mu_{S_j^*}(x)), \quad |X_q| < q, \quad (5)$$

признак  $x_k$  принадлежит  $X_q$ , если  $\mu(\mu_{S_i}(x), \mu_{S_j^*}(x)) < t$ .

Известна модель принятия решений [3] при условии описания входных переменных в виде лингвистических переменных и установления соответствия между наборами нечетких переменных (из термов лингвистических переменных) и элементами множества решений. Данная модель названа моделью классификации, так в ней задаются классы (множества) наборов нечетких переменных, соответствующие определенным решениям.

Входные переменные (факторы), определяющие исходные данные для принятия решений, заданы в виде лингвистических переменных. Эффективность применения лингвистических переменных в подобных ситуациях определяется следующим.

Мнение специалистов при управлении энергетическими объектами можно формально определить экспертным путем. Для этого необходимо для каждого конкретного параметра задачи (фактора) определить базовое множество возможных цифровых оценок  $X$ , смысловое название входного фактора. Лингвистическая переменная (ЛП) задается набором [4]:  $\langle \alpha_i, T(\alpha_i), XI, G, M \rangle, \quad i = \overline{1, n}$ , где  $\alpha_i$  – название  $i$ -ой ЛП;  $T(\alpha_i)$  – терм-множество ЛП  $\alpha_i$ ;  $XI$  – область определения каждого элемента множества  $T(\alpha_i)$ ;  $G$  – синтаксическое правило (грамматика), порождающее элементы ( $j$ -е нечеткие переменные)  $\alpha_i^j \in T(\alpha_i)$ ;  $M$  – семантическое правило, которое ставит в соответствие каждой нечеткой переменной (НП)  $\alpha_i^j \in T(\alpha_i)$  нечеткое множество  $\tilde{C}(\alpha_i^j)$  – смысл НП  $\alpha_i^j$ . Формальное задание входного фактора в виде ЛП раскрывает возможности в моделировании и исследовании истинности высказываний и принимаемых решений субъектом.

Нечеткие переменные (НП)  $\alpha_i^j$ , составляющие терм-множества лингвистических переменных  $\alpha_i$  задаются в виде тройки множеств

$$\langle \alpha_i^j, XI, \tilde{C}(\alpha_i^j) \rangle, \quad j = \overline{1, m}, \quad (6)$$

где  $\alpha_i^j$  –наименование НП;  $XI$ –базовое множество;

$\tilde{C}(\alpha_i^j) = \{ \langle \mu_{C(\alpha_i^j)}(x_i) / x_i \rangle \}, \quad x_i \in XI$  – нечеткое подмножество множества  $XI$ ,

$\mu_{C(\alpha_i^j)}(x_i)$  – функции принадлежности, задание происходит путем экспертного опроса.

Модель принятия решений зададим в виде нечеткой классификационной системы, которая формально представлена набором

$$(X, \Psi, H), \quad (7)$$

где  $X$  – множество признаков-факторов задачи принятия решений,  $\Psi$  – разбиение  $X$  на нечеткие эталонные классы  $L_j, \quad j = \overline{1, H}$ ,  $H$  – множество принимаемых решений.

Множество  $X$  определим  $X=X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ , причем с каждым из множеств  $X_i \subset X, i = \overline{1, n}$  связывается конкретная ЛП  $\alpha_i$  со значениями НП из терм-множества  $T(\alpha_i)$ .

Для построения модели принятия решений необходима соответствующая экспертная информация, которая формализует знания экспертов. Экспертная информация представляется в виде системы условных нечетких высказываний.

$$L : \left\{ \begin{array}{l} \tilde{L}_1; \langle \text{если } \tilde{E}_{11} \text{ или } \tilde{E}_{12} \text{ или } \dots \text{ или } \tilde{E}_{1n_1}, \text{ то } \tilde{B}_1 \rangle; \\ \tilde{L}_2; \langle \text{если } \tilde{E}_{21} \text{ или } \tilde{E}_{22} \text{ или } \dots \text{ или } \tilde{E}_{2n_2}, \text{ то } \tilde{B}_2 \rangle; \\ \dots \dots \dots \\ \tilde{L}_k; \langle \text{если } \tilde{E}_{k1} \text{ или } \tilde{E}_{k2} \text{ или } \dots \text{ или } \tilde{E}_{kn_k}, \text{ то } \tilde{B}_k \rangle, \end{array} \right.$$

где  $\tilde{E}$  — эталонные ситуации (высказывания);  $\tilde{B}$  — нечеткие высказывания.

В соответствии с правилами преобразования нечетких высказываний можно записать следующую систему  $L$ :

$$L : \left\{ \begin{array}{l} \tilde{L}_1; \langle \text{если } \tilde{A}_1, \text{ то } \tilde{B}_1 \rangle; \\ \tilde{L}_2; \langle \text{если } \tilde{A}_2, \text{ то } \tilde{B}_2 \rangle; \\ \dots \dots \dots \\ \tilde{L}_k; \langle \text{если } \tilde{A}_k, \text{ то } \tilde{B}_k \rangle, \end{array} \right.$$

где  $\tilde{A}_i, i = \overline{1, k}$  — нечеткие высказывания вида  $\langle a_L \text{ есть } h_L \rangle$ , где  $a_L$  — обобщенная ЛП, определенная на множестве  $X=X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ , и принимающая значения  $\alpha_{ij}$  с функцией принадлежности

$$\begin{aligned} \mu_{L_j}(\psi) &= \bigcup_{i=1, n_j} \mu_{\alpha_i^j}(x_1) \& \mu_{\alpha_i^j}(x_2) \& \dots \& \mu_{\alpha_i^j}(x_n), \\ x_i &\in XI, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, |H|}, \end{aligned} \tag{8}$$

где  $n_j$  - число наборов  $\alpha_1^j, \dots, \alpha_n^j$  принадлежащих  $j$ -му классу разбиения.

Формулу (8) можно представить и в другом виде:

$$\begin{aligned} \mu_{L_j}(x_1 x_2 \dots x_n) &= \bigcup_{(\alpha_1^j, \alpha_2^j, \dots, \alpha_n^j) \in L_j} \mu_{\alpha_1^j}(x_1) \& \mu_{\alpha_2^j}(x_2) \& \dots \& \mu_{\alpha_n^j}(x_n), \\ x_i &\in XI, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, |H|}. \end{aligned}$$

Модель принятия решений основана на определении степени истинности нечеткого правила *modus ponens* [98]. Согласно данной модели для конкретных значений параметров  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  из множества  $X=X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$  выбирается такое значение  $(x_1^s, x_2^s, \dots, x_n^s) \in X$ , для которого степень истинности нечеткого правила *modus ponens* достигает своего наибольшего значения.

Модель в виде нечеткой классификационной системы представляется таблицей соответствия, содержащей  $|T(\alpha_1)| \times |T(\alpha_2)| \times \dots \times |T(\alpha_n)|$  строк и  $(n+1)$  столбцов. В строках записываются все возможные комбинации значений ЛП  $\alpha_i$  (из терм-множеств  $T(\alpha_i)$ ), а в  $(n+1)$ -м столбце — соответствующие этим комбинациям управляющие решения  $h_l, l = \overline{1, H}$ .

Работа модели осуществляется по следующим правилам.

Измеряют (определяют) физические значения компонент точки  $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \in X$  и подставляют эти значения в функции принадлежности  $\mu_{L_j}$  эталонных классов  $L_j$ .

Вычисляют значения  $\mu_{L_j}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$ ,  $j = \overline{1, |H|}$ . Среди всех значений  $\mu_{L_j}$  находится максимальное  $\mu_{L_s} = \max_j \mu_{L_j}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$  и принимается решение  $h_s$  со степенью принадлежности  $\mu_{L_s}$ .

Достоинство модели классификации при построении систем принятия решений состоит в возможности установления достаточно полного соответствия между наборами нечетких переменных, характеризующих состояние системы и объекта управления, и элементами множества  $H$  принятия управляющих решений.

Однако данная модель обладает недостатком. Если число ЛП велико, а также значительны размеры мощностей их терм-множеств, то таблица соответствия «ситуация-действие» существенно разрастается. Заполнять эту таблицу экспертными данными не предоставляется никакой возможности при большом числе ЛП.

Известна модель, названная в работе [5] модель композиции, которая в работе [3] названа более полно моделью вычисления степени истинности нечетких правил вывода. Применение этой модели позволит избежать недостатка модели классификации, связанного с ростом числа строк таблицы соответствия «ситуация-действие». Модель вычисления степени истинности нечетких правил вывода задается тройкой  $(X, T, H)$ , где  $T$  – нечеткое отношение на множестве  $X \times H$ , причем  $T$  – нечеткое соответствие, которое выводится на основе словесно-качественной информации экспертов, причем  $X \times H \xrightarrow{T} H$ .

Заметим, что в данной модели множества  $H$  рассматривается как множество НП из терм-множества ЛП – принимаемое решение.

Формальное задание модели вычисления степени истинности нечетких правил вывода происходит следующим образом.

Элементы множества  $X$  – множества, составляющего прямое произведение множеств входных факторов  $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ , определяются при конкретной постановке задачи управления.

Определяется ЛП – принимаемое решение и задаются элементы из терм-множества ЛП, характеризующие нечетко заданное принятие решения. Эксперт описывает принятия решений в виде некоторого множества  $T$ , содержащего высказывания  $\{\pi_j\}$ ,  $j = \overline{1, l}$ . Высказывания  $\pi_j$  формализуют посредством назначающих, условных и безусловных операторов. Для каждого высказывания  $\pi_j$  выводится функция принадлежности  $\mu_{\pi_j}(x_1, x_2, \dots, x_n, h_i)$ .

Для отношения  $T$  значения функции принадлежности определяется через обобщенную операцию  $\sigma$ , так что

$$\mu_T(x_1, x_2, \dots, x_n, h_i) = \sigma_{\mu_{\pi_j}}(x_1, x_2, \dots, x_n, h_i). \quad (9)$$

В результате модель вычисления степени истинности нечетких правил вывода будет иметь вид

$$(X, T, H), X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n, T = \bigotimes_{j=1, \bar{L}} T(\pi_j). \quad (10)$$

Построенная таким образом модель вычисления степени истинности нечетких правил вывода работает по следующему алгоритму при принятии управляющего решения.

Для момента времени  $t_0$  определяется координата множества  $X$   $x^0 = (x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \in X$ , характеризующая состояние объекта управления в этот момент времени  $t_0$ . Для точки  $x^0$  определяют значения функций принадлежности  $\mu_{T(\pi_j)}(x^0, h_i)$  нечеткого выбора  $h_i$  решения об управлении.

Затем выбирается такое значение базового множества лингвистической переменной, качественно определяющей принимаемое решение, при котором значение функций принадлежности  $\mu_{T(\pi_j)}(x^0, h_i)$  имеет максимальное значение

$$\mu_{T(\pi_s)}(w^0, h_s) = \max_j \mu_{T(\pi_j)}(w^0, h_i).$$

К числу достоинств данной модели следует отнести ее упрощенную реализацию по сравнению с моделью классификации, так как в данной модели не осуществляется экспертами перебор и анализ всех нечетких ситуаций, которые могут существовать при решении задачи управления. Эксперты формулируют правила вывода лишь для наиболее значимых, с их точками зрения, нечетких ситуаций, характеризующих объект управления, и соответствующих им нечетким решениям о параметрах управления.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. — М.: Наука, 1990. — 272 с.
2. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика, — М.: Наука, 1988. — 288с.
3. Берштейн Л.С., Финаев В.И. Адаптивное управление с нечеткими стратегиями. — Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 1993. — 134 с.
4. Заде Л. Понятие лингвистических переменных и его применение к принятию к принятию приближенных решений. — М.: Мир, 1976. — 165 с.
5. Мелихов А.Н., Баронец В.Д. Проектирование микропроцессорных устройств обработки нечеткой информации. — Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1990. — 128 с.

УДК 681.51.01(075.8)

Д.А. Белоглазов

#### ОСОБЕННОСТИ НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕШЕНИЙ, ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ, ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

В настоящее время существует огромное разнообразие систем, в основе которых лежат методы, использующие элементы искусственного интеллекта [1]. Продукция, основанная на использовании тех или иных методов ИИ, так прочно