

## К І Б Е Р Н Е Т И К А

УДК 658.012.011.56

### АДАПТИВНЫЕ САМООБУЧАЮЩИЕСЯ СИСТЕМЫ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

*А.А.Каргин*

**Введение.** В настоящее время все более широкое применение находят методы и модели искусственного интеллекта при реализации систем управления. Подавляющее большинство научных исследований и промышленных реализаций интеллектуальных моделей посвящено созданию интеллектуальных и нечетких регуляторов [1-3], которые решают задачи нижнего исполнительного уровня в иерархических системах управления. Интеллектуализация алгоритмов управления верхних координационного и организационного уровней осуществляется с использованием моделей ситуационного управления [4-7], которые, в отличие от логико-программных методов, поддерживают функционирование системы в хаотическом внешнем мире, существенно улучшают характеристики надежности и технико-экономические показатели. Методы и математические модели ситуационного управления развиваются в двух направлениях:

- 1) управление большими системами, в которых для принятия решений не используется сенсорная информация, обрабатываемая в реальном времени (off-line системы) [4,5,8];
- 2) управление техническими системами в реальном времени на основе разнородной сенсорной информации [6,7,9].

Последний класс систем – ситуационные системы управления реальным временем (ССУРВ) – формализованы на базе аппарата нечетких множеств [6,9,11] и нашли промышленное применение [6,7]. ССУРВ удовлетворяют следующим принципам организации [11]:

- А). Наличие взаимодействия системы управления с объектом и неупорядоченным окружением в реальном времени с использованием информационных каналов.
- Б). Наличие механизма автоматического формирования в реальном времени модели ситуации, описывающей окружение и объект управления на основе разнородной информации, поступающей от датчиков, сенсорных приборов, пультов и других устройств.
- В). Наличие механизма формирования управляющих воздействий на объект на основе знаний в реальном времени.
- Г). Открытость системы с целью повышения интеллектуальности и совершенствования собственного поведения.

Открытость ССУРВ предполагает адаптацию алгоритмов управления, во-первых, к изменяющимся во времени свойствам объекта управления и характеристикам окружения (самообучение), а, во-вторых, к изменениям в структуре объекта и окружения (самоорганизация).

Настоящая работа посвящена формализации механизма автоматического приобретения знаний, реализующего самообучение в ССУРВ.

**Модель ССУРВ.** В основу модели ситуационной системы управления положена идеология продукционных систем. Формализация выполнена на базе аппарата нечетких множеств [9]. ССУРВ это пятерка: <БД, БЗ, И, запрос, цель>. В произвольный момент времени  $t$  база данных (БД) содержит модель текущей ситуации, характеризующей состояние окружения и объекта, а также стадию решения задачи управления:

$$\tilde{S} = \{ \tilde{C} = \{ \tilde{C}_0, \tilde{C}_1, \dots, \tilde{C}_k \}, \tilde{U} \}, \quad (1)$$

где  $\tilde{C}_0$  – множество элементов, функции принадлежности которых формируются непосредственно на основе показаний датчиков или других сенсорных приборов и устройств ввода информации;  $\tilde{U}$  – множество элементов, функции принадлежности которых формирует ССУ по правилам из процедурной базы знаний (ПБЗ) и которые непосредственно связаны с исполнительными механизмами, изменяющими ситуацию (управляющие сигналы);  $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2, \dots, \tilde{C}_k$  – множество элементов, функции принадлежности которых формирует ССУ по правилам из декларативной базы знаний (ДБЗ), но не связанных с внешним миром. Нечеткое множество  $\tilde{C}_1$ , по сути дела, является структурированной моделью ситуации первого уровня,  $\tilde{C}_2$  – моделью второго уровня и так далее.

База знаний (БЗ) состоит из двух частей: множество правил продукции  $\tilde{\Pi}_п = \{ \tilde{\Pi}_i \}_{i=1}^m$  – процедурная база знаний и множество правил индукции

$\tilde{\Pi}_н = \{ \tilde{\Pi}_{c^0 c^1 \dots c^e}^i \}_{i=1}^m$  – декларативная база знаний. Правила продукции имеют вид

$$\tilde{\Pi}_{уд}^i = \{ (\tilde{Y}_{\tilde{r}}^i, \tilde{P}_{\tilde{y}}^i), (\tilde{D}_{\tilde{r}}^i, \tilde{P}_{\tilde{d}}^i) \}, \quad (2)$$

где  $\tilde{Y}_{\tilde{r}}^i$  – нечеткое множество, эталон фрагмента ситуации, в которой, применимо правило;  $\tilde{D}_{\tilde{r}}^i$  – нечеткое множество фрагмент ситуации, на который в случае применимости правила, изменяется состояние БД;  $\tilde{P}_{\tilde{y}}^i, \tilde{P}_{\tilde{d}}^i$  – нечеткие отношения, заданные на пересечении множеств  $\tilde{Y} \times \tilde{C}, \tilde{D} \times \tilde{U}$ . Правила индукции из ДБЗ представлены в виде

$$\tilde{\Pi}_{12..k}^i = \{ (\tilde{C}_{01}^i, \tilde{\exists}_{01}^i), (\tilde{C}_{02}^i, \tilde{\forall}_{01}^i), (\tilde{C}_{03}^i, \tilde{IF}_{01}^i), \dots, \{ (\tilde{C}_{k-11}^i, \tilde{\exists}_{01.k}^i), (\tilde{C}_{k-12}^i, \tilde{\forall}_{01.k}^i), (\tilde{C}_{k-13}^i, \tilde{IF}_{01.k}^i) \} \}, \quad (3)$$

где  $\tilde{C}_{je}^i$  – нечеткие множества эталоны фрагментов ситуации, заданные на множестве элементов  $\tilde{C}_j$  ( $j = 0, k$ );  $\tilde{\exists}_{01.l}^j, \tilde{\forall}_{01.l}^j, \tilde{IF}_{01.l}^j$  – нечеткие отношения, заданные на пересечении множеств  $\{ \tilde{C}_0, \tilde{C}_1, \dots, \tilde{C}_{e-1} \} \times \tilde{C}_e$  ( $l = 1, k$ ).

С помощью  $\tilde{\exists}_{01.l}^j$  задается отношение “хотя бы один элемент”;  $\tilde{\forall}_{01.l}^j$  – “все элементы”;  $\tilde{IF}_{01.l}^j$  – “условное множество” [12].

Интерпретатор правил (И) выполняет две фазы обработки базы знаний на каждом шаге нахождения глобальной продукции [9]:

1. Формирование структурированной модели ситуации (вычисление  $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2, \dots, \tilde{C}_k$ ) в базе данных на основании  $\tilde{C}_0$  (контрольно-измерительная информация и показания датчиков) по декларативным правилам (3).

$$\underline{S}^+ = \underline{S} \text{ Ind } \underline{\Pi}_n = \{(\underline{S} \text{ Ind } \underline{\Pi}_{1,k}^1) \cup (\underline{S} \text{ Ind } \underline{\Pi}_{1,k}^2) \dots \cup (\underline{S} \text{ Ind } \underline{\Pi}_{1,k}^m)\},$$

где

$$\underline{S}_i^+ = \underline{S} \text{ Ind } \underline{\Pi}_{1,k}^i = \{C_0^+ = C_0^+, \quad (4)$$

$$C_1^+ = \{\exists_{01}^i [C_0^+] \cup \forall_{01}^i [C_0^+] \cup IF_{01}^i [C_0^+]\}, C_i^+ = \{\exists_{01..e}^i [\{C_0^+, \dots,$$

$$C_{e-1}^+\} \cup \forall_{01..e}^i [\{C_0^+, \dots, C_{e-1}^+\}] \cup IF_{01..e}^i [\{C_0^+, \dots, C_{e-1}^+\}]\};$$

$\underline{S}^+$  – нечеткое множество, индуцированное отношениями  $\underline{\exists}, \underline{\forall}, IF$ .

2. Нахождение глобальной продукции путем применения правил из ПБЗ (2) к модели ситуации в БД, построенной на первой фазе:

$$\underline{S}^+ = \underline{S} \text{ Prod } \underline{\Pi}_n = (\dots((\underline{S} \text{ Prod } \underline{\Pi}_{YD}^1) \text{ Prod } \underline{\Pi}_{YD}^2) \dots \text{ Prod } \underline{\Pi}_{YD}^N), \quad (5)$$

где  $\underline{S}_i = \underline{S} \text{ Prod } \underline{\Pi}_{YD}^i = \text{ChC}_{YD} \underline{S}$  – продукция правила  $\underline{\Pi}_{YD}^i$ ;

$\text{ChC}_{YD} \underline{S} = \text{Ch}_U \underline{S}$  – операция условного изменения фрагмента  $U$  нечеткого множества  $\underline{S}$ ;

$$\underline{U}' = (P_{SU}[\Delta^\alpha(P_Y[Y], S)] \cap P_D[D]) \cup (P_{SU}[\Delta^\alpha(P_Y[Y], S) \cap U]);$$

$$\Delta^\alpha(A, B) = \left| \underline{A - B} \right|_\alpha \text{ – обычное множество } \alpha\text{-уровня ближайшее к нечеткому, найден-$$

ному как абсолютная разность двух нечетких множеств;

$\text{Ch}_U \underline{S}$  – операция безусловного изменения фрагмента  $U$  нечеткого множества  $\underline{S}$  на фрагмент  $\underline{U}'$ .

Формализация операции  $\text{Ch}_U \underline{S}$  дана в [9,11]. Найдены условия  $\underline{D}_i \cap \underline{D}_j = \emptyset$ ,  $\underline{Y}_i \cap \underline{D}_j = \emptyset$ ,  $\underline{Y}_j \cap \underline{D}_i = \emptyset$ , при которых операция условного изменения нечеткого множества ассоциативна [9].

Решением задачи управления  $\underline{\psi} \rightarrow \underline{\phi}$ , где  $\underline{\psi}$  – модель запроса на решение задачи;

$\underline{\phi}$  – модель цели, является упорядоченное множество ситуаций

$$\langle \underline{S}_0, \underline{S}_1, \dots, \underline{S}_K \rangle, \quad (6)$$

для которых выполняются условия:

$$1) \text{COM}_\alpha(\underline{\psi}, \underline{S}_0) = \underline{\psi}, \text{COM}_\alpha(\underline{\phi}, \underline{S}_K) = \underline{\phi}; \quad (7)$$

2)  $\underline{S}_i$  и  $\underline{S}_{i+1}$  попарно связанные правилом-законом:

$$S_{i+1} = Z_j(S_i), S_i = S_i^* \text{Prod} \prod_{YD}^i$$

где  $Z_j = \{A_j^-, A_j^+\}$  – нечеткое множество, описывающее закон окружения, который в ситуации  $S_i$  изменит фрагмент  $A_j^+$ , если  $COM(S_i, A_j^-) = A_j^-$ ;

$$COM_\alpha(A, B) = \{s | \forall s \in S: \mu_{\Delta^\alpha} = 0\}, \Delta^\alpha = \Delta^\alpha(A, B).$$

**Формализация механизма самообучения.** Задача механизма самообучения адаптивных ССУРВ – автоматически на последовательности примеров сформировать новое продукционное правило (2) для “незнакомой” ситуации. Сформировать правило (2) означает построить его компоненты: нечеткие множества  $Y, D$  и нечеткие отношения  $P_Y, P_D$ .

Пусть  $\langle S_1, S_2, \dots, S_l \rangle$  – последовательность примеров, которая удовлетворяет условиям:

$$\bigcap_{i,j=1..k} COM_\alpha(S_i, S_j) = \Omega_1, i \neq j; \Omega_1 \subset S, \tag{8}$$

$$\bigcap_{i,j=1..k} COM_\alpha(S_i, S_j) = \Omega_2, i \neq j; \Omega_2 \subset U.$$

Условие (8) означает, что, например,  $\Omega_1$  является общим фрагментом для всех ситуаций последовательности примеров, т.е.  $\mu_{S_j}(s), s \in \Omega_1$  для всех  $j = 1, l$  неразличимы по  $\alpha$ -уровню.

Расширим определение БД (1). Введем обычное множество  $\Pi = \{Y, D\}$ , с взаимно однозначным отображением  $R$  элементов множества  $\{S, U\}$  из (1) в элементы множества  $\Pi$ . Механизм самообучения на множестве  $\Pi$  формирует новое правило. Цель обучения – сконструировать правило, для которого выполняются условия:

$$\mu_{\underset{Y}{\sim}}(y_i) \cong \mu_{\underset{S}{\sim}}(s_i), \forall s_i \in \Omega_1; \mu_{\underset{P}{\sim}}(y_i, s_i) \cong \begin{cases} 1, \forall s_i \in \Omega_1 \\ 0, \forall s_i \notin \Omega_1 \end{cases}, \tag{9}$$

$$\mu_{\underset{D}{\sim}}(d_i) \cong \mu_{\underset{U}{\sim}}(u_i), \forall u_i \in \Omega_2; \mu_{\underset{P_D}{\sim}}(d_i, u_i) \cong \begin{cases} 1, \forall u_i \in \Omega_2 \\ 0, \forall u_i \notin \Omega_2 \end{cases}.$$

Получено выражение для операции формирования компонент правила (2) на примере  $S_i$ :

$$P_y = (P_y @ S_i) = [P_y^+ \wedge (S_i^e \cap \overline{\Delta^\alpha(Y, S_i)})] \bullet [S_i^\alpha \cup \overline{\Delta^\alpha(Y, S_i)}], \tag{10}$$

$$Y = (Y @ S_i) = (Y \bullet P_y) \oplus (S_i \bullet \overline{P_y}),$$

где “ $\wedge$ ” – алгебраическая сумма двух нечетких множеств;

“ $\bullet$ ” – алгебраическое произведение;

“ $\oplus$ ” – граничная сумма;

$\tilde{S}^\varepsilon, \tilde{S}^\sigma$  – специальные нечеткие множества, у которых

$$\mu_{\tilde{S}^\varepsilon}(s) = \varepsilon, \forall s \in S \text{ и } \mu_{\tilde{S}^\sigma}(s) = \sigma, \forall s \in S.$$

Доказано, что существует такое  $l^*$  (длина обучающей последовательности), что для всех  $l > l^*$  операция (10) формирует правило, удовлетворяющее условиям (9). На рис.1 приведена зависимость функции принадлежности  $i$ -го элемента, формируемого отношения, от количества примеров.

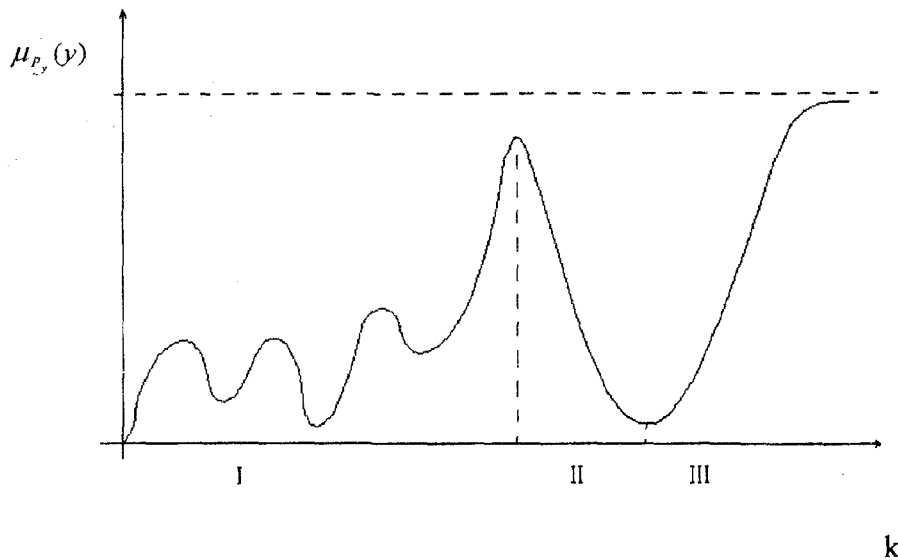


Рис. 1. Зависимость  $\mu_{P_y}(s)$  от длины обучающей последовательности

На участке I функция принадлежности элемента в последовательности примеров принимала случайные значения; на участке II для каждой пары смежных примеров функции принадлежностей элемента различались более чем на  $\alpha$ ; на участке III функции принадлежностей во всех примерах были постоянны с точностью до  $\alpha$ , т.е. выполнено условие (8). На рис.2 приведено поведение  $\mu(S)$ .

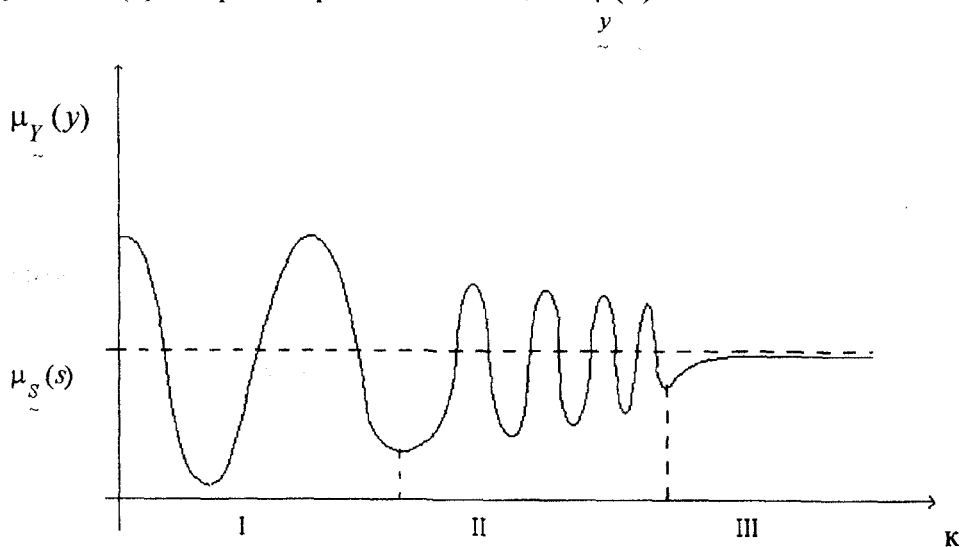


Рис. 2. Зависимость  $\mu_Y(y)$  от длины обучающей последовательности.

**Технология приобретения продукционных знаний в режиме обучения с учителем.** Рассмотрим решение задачи управления (6). Среди продукционных правил в БЗ должны быть:

А) Хотя бы одно правило, связывающее ситуации  $S_{\sim k-1}, S_{\sim k}$  в смысле (7). Назовем его положительным активным правилом и обозначим  ${}^+P_k$ .

Б) Хотя бы одно общее правило  ${}^0P_l$ , связывающее ситуации  $S_{\sim k-1}$  и  $S_{\sim k-2}$ . Правило названо общим в том смысле, что оно применимо к некоторому подмножеству ситуаций и его действие приводит к результатам, показанным на рис.3. Примерами таких правил являются безусловные рефлексы живых организмов [12], когда определенный раздражитель вызывает одну и ту же реакцию независимо от состояния организма и его окружения (ситуации); в технике – это кнопки пультов ручного управления, непосредственно связанные с приводами отдельных степеней подвижности робототехнического комплекса или автоматической линии [7]. Правила этого типа имеют вид:

$${}^0P_l : \text{ЕСЛИ } \{ \text{кнопка\_вправо} | 1 \} \text{ ТОГДА } \{ \text{привод\_вправо} | 1 \}.$$

На рис.3 показано, что только в ситуации  $S_{\sim k-2}$  правило  ${}^0P_l$  приводит к новой ситуации  $S_{\sim k-1}$ , к которой применимо правило  ${}^+P_k$ , продукция которого формирует целевую в смысле (7) ситуацию  $S_{\sim k}^*$ .

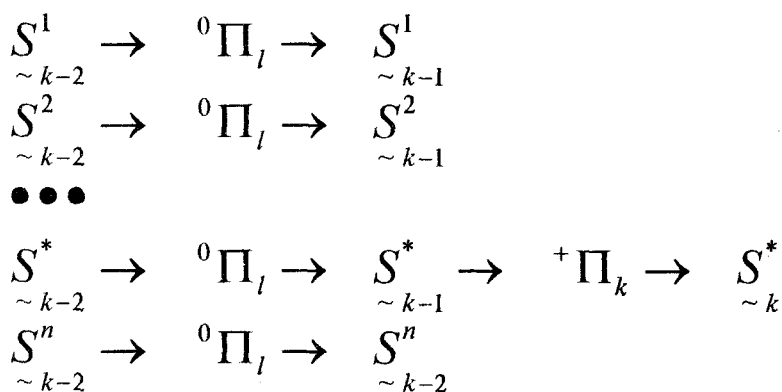


Рис.3. К иллюстрации переходов ситуаций

Таким образом, во-первых, продукция правила  ${}^+P_k$  должна инициировать формирование уникального правила  ${}^+P_{k-1}$  применимого только к ситуации  $S_{\sim k-2}$ , принадлежащей решению задачи (6). Во-вторых, правило  ${}^+P_{k-1}$  формируется на основе ситуации  $S_{\sim k-2}$  (пример) при продуцировании правила  ${}^0P_l$ . Пусть в момент времени  $t_1$  появилась ситуация  $S_{\sim k-2}$  и к ней было применимо правило  ${}^0P_l$  (учитель инициировал действие, например, нажатием кнопки ручного управления.) Реализация законов окружения приводит к появлению ситуации  $S_{\sim k-1}$  в момент времени  $t_2$ . В этот момент

применяется правило  ${}^+P_k$ , продукция которого связана с формированием правила  ${}^+P_{k-1}$ . Формализуем этот механизм. Введем в ССУРВ память путем расширения БД в (1):

$\tilde{S}' = \{ {}^0S, \tilde{S} \}$ , где  ${}^0S = \{ C / C_{01}, U \}$ ;  $C_{01}$  – элементы, на которых построены общие правила;  ${}^0S$  – состояние БД на предыдущем шаге глобальной продукции;  ${}^0S = R[\tilde{S}]$ ;  $R$  – взаимно-однозначное отображение на  $S \times {}^0S$ .

Операция формирования правила  ${}^+P_{k-1}$  на  $i$ -м примере ситуации имеет вид с учетом (2) и (10):

$${}^+P_{k-1} = {}^+P_{k-1} @ \tilde{S}'_i = \{ ((P_y @ {}^0S_i), (Y @ {}^0S_i)), ((P_d @ {}^0S_i), (D @ {}^0S_i)) \} \quad (11)$$

Продукция правила  ${}^+P_k$  с самообучением (автоматическим формированием правила  ${}^+P_{k-1}$ ) является нечеткое множество, формируемое в расширенной БД  $\tilde{S}^\Sigma = \{ {}^0S, \tilde{S}, \Pi \}$ :

$$\tilde{S}^\Sigma \text{ Prod}(@) {}^+P_k = \text{Ch} C_{AB} \tilde{S}^\Sigma. \quad (12)$$

### Заключение

1. Для эффективного обучения учитель должен формировать последовательность примеров ситуаций таким образом, чтобы, во-первых, она удовлетворяла условиям (8), а, во-вторых, для смежных примеров функции принадлежности элементов,  $s_i \notin \Omega_1$ ,  $u_i \notin \Omega_2$  должны отличаться более чем на  $\alpha$ . В этом случае длина обучающей последовательности минимальна, так как обучение проходит в зонах II и III, приведенных на рис.1.

2. ССУРВ одновременно может формировать только одно новое правило.

3. Условием завершения формирования нового правила является:

$$\mu_{P_y}(y_i, s_i) \geq 1 - \delta, \forall s_i \in \Omega_1; \mu_{P_y}(y_i, s_i) \leq \delta, \forall s_i \notin \Omega_1.$$

Сформированное правило в дальнейшем может использоваться в качестве активного положительного, формирующего другое новое правило.

4. Технология приобретения знаний в режиме обучения с учителем позволяет автоматически наполнить базу знаний корректными правилами.  $L$ -шаговая ( $L > l_1 + l_2 + \dots + l_m$ ) глобальная продукция с самообучением (12) формирует полную БЗ такую, что  $k$ -шаговая глобальная продукция (5) является решением задачи (6) и (7).

5. Технология приобретения знаний, изложенная в настоящей работе, имеет практическое значение, нашла промышленное применение при формировании фрагмента правил управления в "нештатных ситуациях" автоматическими линиями нанесения гальванопокрытий [16] и управлением вагонозамедлителями на сортировочных горках [13].

Пункты 1-4 заключения согласуются с технологией обучения животных методом дрессировки [12]

## РЕЗЮМЕ

Дається формальне визначення ситуаційної системи управління реального часу на підставі нечітких множин. Структурована модель ситуації відображає стан об'єкта і оточення і знаходиться в реальному часі по декларативним правилам на підставі показань сенсорів.

Формалізован механізм автоматичного формування правил продукції на послідовність прикладів. Дається технологія придбання продукційних знань в реальному часі в режимі навчання з вчителем.

## SUMMARY

On the basis of fuzzy sets the formal apparatus of real time situational control are being developed. Model representation of structured multi-layered situation and real time knowledge-based and sensor-based processing mechanism are described. Real-time technique of production rules construction based on situational examples is developed.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Захаров В.Н., Ульянов С.В. Нечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления: Эволюция и принципы построения. – Изв.РАН Техническая кибернетика. – 1993. – № 4.
2. Earl Cox. The Fuzzy Systems Handbook: A Practitioner's Guide to Building, Using, and Maintaining Fuzzy Systems. Academic Press, Boston, 1994.
3. Liang J., Yang Y., Hi Y. Real-time expert control system // Inf. and Contr., 1993, v.22. – №2.
4. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. – М.: Наука. –1986.
5. Мелихов А.Н., Берштейн Л.Е., Коровин С.Д. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. – М.: Наука, 1990.
6. Каргин А.А., Демин В.А., Новиков В.Б. Ситуационная производственная система управления технологическими процессами в производстве нанесения гальванопокрытий (СПРУТ-1). – Приборы и системы управления. – 1993. – №3.
7. Каргин А.А., Тимофеев А.В. Интегрированные адаптивные системы сквозного технологического цикла в ГПС // ГПС в действии. – Л.: Машиностроение, 1991.
8. Клыков Ю.И. Ситуационное управление большими системами. – М.: Энергия, 1974.
9. Каргин А.А. Об использовании нечетких знаний в задачах управления движением поездов. Ч.1. Производственные модели знаний на основе нечетких множеств. – Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1996. – № 6.
10. Каргин А.А., Демин В.А., Новиков В.Б. О применении аппарата теории правил в системах управления циклового типа. – Теория управляющих систем. Наук. думка. – Киев: 1987.
11. Каргин А.А. Системы ситуационного управления реального времени: Контроль і управління в технічних системах / Збірник праць четвертої міжнародної науково-технічної конференції. Т.3. – Вінниця: ВДТУ, 1997.
12. Павлов И.М. Лекции о работе больших полушарий головного мозга. – М.: Изд-во АН СССР, 1949.
13. Кожемякин Ю.А. Управление системой вагонных замедлителей, основанное на нечетких знаниях: Контроль і управління в технічних системах. – Збірник праць четвертої міжнародної науково-технічної конференції. Т.3. – Вінниця: ВДТУ, 1997.

*Надійшла до редакції 28.11.1997 р.*