



УДК 004.82:16

© 2002 г. Ю.А. Григорьев, д-р техн. наук

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

## **ОБРАБОТКА НЕНАДЕЖНЫХ ЗНАНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СИСТЕМЕ ПРОДУКЦИЙ CLIPS**

Рассматриваются методы нечеткого логического вывода, которые используются в системе Clips и других оболочках, применяемых для разработки экспертных систем на основе правил продукции. Анализируются простые и сложные правила базы знаний с четкими и нечеткими факторами и заключениями.

### **Введение**

В настоящее время широко применяются экспертные системы, где используется продукционная модель представления знаний [4 – 7]. Эта модель имеет следующие преимущества.

Используются знания с высокой однородностью, так как правила описываются по одному синтаксису (если А, то В). Для этой модели свойственна простота дополнения знаний, их модификации и аннулирования.

Имеются инструментальные средства (оболочки), позволяющие создавать экспертные системы, основанные на правилах продукции: GURU (MDBS), ЭКО (ArguSoft), Clips, G2 (Gensym). G2 – это очень мощное средство, которое используется для создания интеллектуальных систем реального времени.

Модель позволяет обрабатывать ненадежные знания. Для этого используются методы обработки условных вероятностей (байесовский подход) [4] и методы нечеткой логики Заде [2, 9].

Для байесовского подхода к построению продукционной базы ненадежных (нечетких) знаний характерна большая трудоемкость статистического оценивания априорных шансов, а также факторов достаточности и необходимости [4]. В этом случае целесообразнее использовать метод обработки ненадежных знаний на основе нечеткой логики Заде, который рассматривается в данной статье.

## Некоторые сведения о нечетких множествах

Обычное (четкое) подмножество  $A$  некоторого множества  $E$  определяется следующим образом:

$$A = \{\mu_A(x) / x\}, \quad (1)$$

где  $\mu_A(x)$  – характеристическая функция, принимающая значение 1, если  $x$  принадлежит подмножеству  $A$ , и 0 – в противном случае.

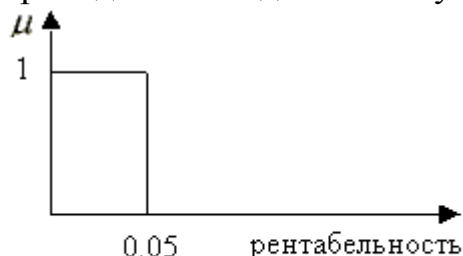


Рис. 1. Графическое представление четкого множе-

Пример четкого множества. Пусть  $x$  – рентабельность предприятия. Известно, что если рентабельность находится в интервале  $0 \leq x \leq 0.05$ , то она считается неудовлетворительной. Соответствующее подмножество  $A$  можно представить в виде (1), где  $\mu_A(x)$  принимает значение 1, только если  $0 \leq x \leq 0.05$ , и 0 – в противном случае. Это подмножество

можно представить графически (рис. 1).

Но с некоторой степенью уверенности можно утверждать, что рентабельность является неудовлетворительной и при некоторых  $x$ , которые больше 0.05. Чтобы отразить это свойство, вводится понятие нечеткого подмножества.

Нечеткое подмножество  $A$  (в дальнейшем просто множество) некоторого множества  $E$  определяется следующим образом:

$$A = \{\mu_A(x) / x\}, \quad (2)$$

где  $\mu_A(x)$  – характеристическая функция принадлежности (или просто функция принадлежности), принимающая значение на отрезке  $[0, 1]$ .

Пример нечеткого множества. Неудовлетворительную рентабельность определим в виде нечеткого множества (2), где

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq 0.05, \\ -20x + 2, & 0.05 < x \leq 0.1, \\ 0, & x > 0.1. \end{cases}$$

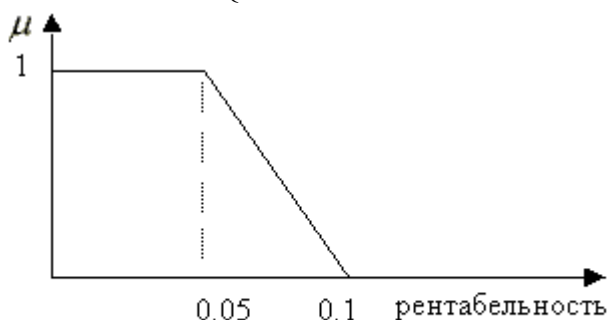


Рис. 2. Графическое представление нечеткого множества.

Это множество также можно представить графически (рис. 2), график можно трактовать следующим образом: если  $0 \leq x \leq 0.05$ , то рентабельность является неудовлетворительной со степенью достоверности 1; если  $0.05 < x \leq 0.1$ , то рентабельность можно считать неудовлетворительной, но с некоторой степенью достоверности, которая меньше

1.

*Лингвистической переменной* называется множество термов, каждый из которых является нечетким множеством. Например, представить в виде следующей лингвистической переменной:

$r = \{\text{неудовлетворительно, удовлетворительно, хорошо, отлично}\}$ .

Термы, указанные при описании переменной, являются нечеткими множествами, которые представлены на рис. 3.

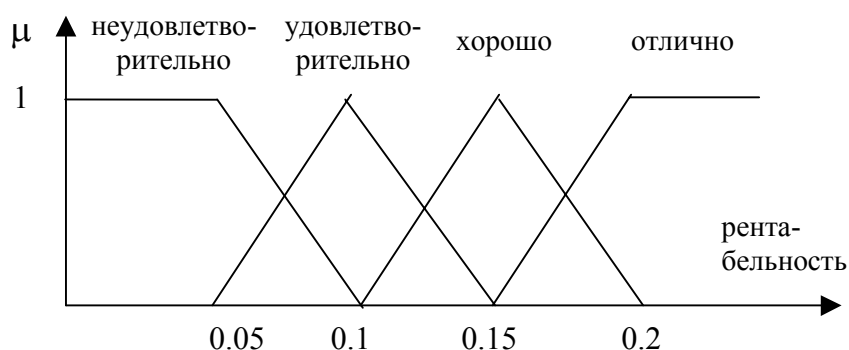


Рис. 3. Представление лингвистической переменной.

Как видно из рис. 3, нечеткие множества разных термов могут пересекаться.

### Простые правила базы знаний

Простое правило продукции (с одной посылкой и одним заключением) можно представить в следующем виде:

$$\begin{array}{l}
 \text{if } A \text{ then } C \quad CF_r \\
 A' \quad \quad \quad CF_f \\
 \hline
 C' \quad \quad \quad CF_c
 \end{array} \quad (3)$$

где  $A$  – посылка правила продукции;  $A'$  – факт, соответствующий посылке  $A$  правила продукции;  $C$  – заключение (следствие) правила продукции;  $C'$  – фактическое заключение, помещаемое в список фактов после выполнения (срабатывания) правила продукции;  $CF_r$  – фактор уверенности правила;  $CF_f$  – фактор уверенности факта  $A'$ ;  $CF_c$  – фактор уверенности заключения  $C'$ .

Существуют три типа простых правил:

1. CRISP\_ – левая часть правила (посылка) содержит четкий объект.
2. FUZZY\_CRISP – левая часть правила содержит нечеткий объект (множество), а правая часть (заключение) – четкий объект.
3. FUZZY\_FUZZY – левая и правая части правила содержат нечеткие объекты.

*Правило типа CRISP\_.* В этом случае правило срабатывает, если  $A'$  совпадает с  $A$ . При этом заключение  $C'$  будет равно  $C$ . Фактор уверенности заключения  $C'$  рассчитывается по формуле:

$$CF_c = CF_r \cdot CF_f. \quad (4)$$

Например, если  $CF_r = 0.8$  и  $CF_f = 0.7$ , то  $CF_c = 0.8 \cdot 0.7 = 0.56$ .

**Правило типа FUZZY\_CRISP.** В данном случае  $A$  и  $A'$  – это нечеткие множества одной и той же лингвистической переменной. Правило срабатывает, если даже  $A'$  не совпадает с  $A$ . При этом заключение  $C'$  будет равно  $C$ . Фактор уверенности заключения  $C'$  рассчитывается по формуле:

$$CF_c = CF_r \cdot CF_f S, \quad (5)$$

где  $S$  определяет меру подобия (совпадения) нечетких множеств  $A$  и  $A'$ .

$$\begin{aligned} S &= P(A/A'), & \text{если } N(A/A') > 0.5; \\ S &= (N(A/A') + 0.5) \cdot P(A/A'), & \text{если } N(A/A') \leq 0.5, \end{aligned} \quad (6)$$

$$P(A/A') = \max_x \min(\mu_A(x), \mu_{A'}(x)),$$

где  $x$  пробегает все значения универсального множества нечеткой переменной.

$$N(A/A') = 1 - P(\bar{A}/A'),$$

$\bar{A}$  – дополнение нечеткого множества  $A$ , которое имеет следующую функцию принадлежности:  $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$ .

**Пример расчета  $S$ .** На рис. 4 показаны функции принадлежности нечетких множеств  $A$  и  $A'$  и минимум между этими функциями.

На рис. 5 представлены функции принадлежности нечетких множеств  $\bar{A}$  и  $A'$  и минимум между этими функциями.

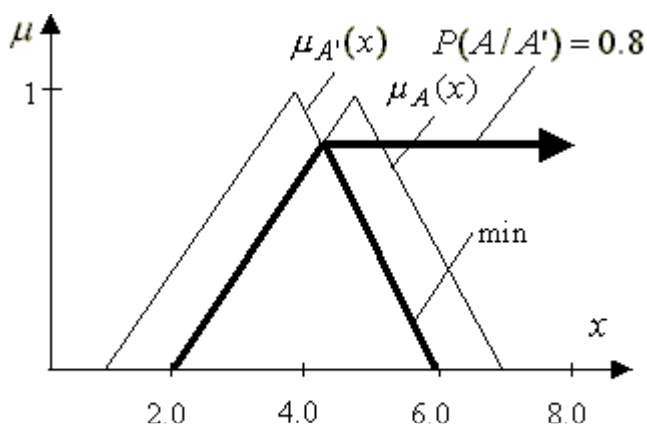


Рис. 4. Иллюстрация расчета

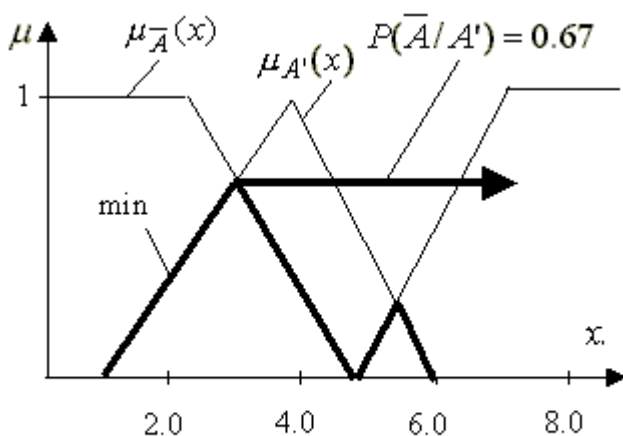


Рис. 5. Иллюстрация расчета

Из графика рис. 5 следует, что  $N(A/A') = 1 - P(\bar{A}/A') = 1 - 0.67 = 0.33 < 0.5$ . Тогда из (6) получим, что  $S = (0.33 + 0.5) \cdot 0.8 = 0.66$ .

Поэтому, если  $CF_r = 0.8$  и  $CF_f = 0.7$ , то  $CF_c = 0.8 \cdot 0.7 \cdot 0.66 = 0.37$ .

**Правило типа FUZZY\_FUZZY.** Как и в предыдущем случае, здесь  $A$  и  $A'$  – это нечеткие множества одной и той же переменной. Правило срабатывает, если даже  $A'$  не совпадает с  $A$ . Функция принадлежности нечет-

кого заключения  $C'$  определяется с помощью следующего выражения:

$$\mu_{C'}(u) = \min(z, \mu_C(u)), \quad (7)$$

где  $z = \max_x \min(\mu_A(x), \mu_{A'}(x))$ .

Фактор уверенности заключения  $C'$  рассчитывается по формуле:

$$CF_{C'} = CF_r \cdot CF_f. \quad (8)$$

*Пример.* Пусть  $A$  означает "финансовое состояние предприятия хорошее", а  $C$  – "надежность высокая". Пусть далее установлен факт  $A'$ , что "финансовое состояние предприятия удовлетворительное". На рис. 6 показаны функции принадлежности нечетких множеств  $A'$ ,  $A$ ,  $C$  и функция принадлежности фактического заключения, полученная из (7).

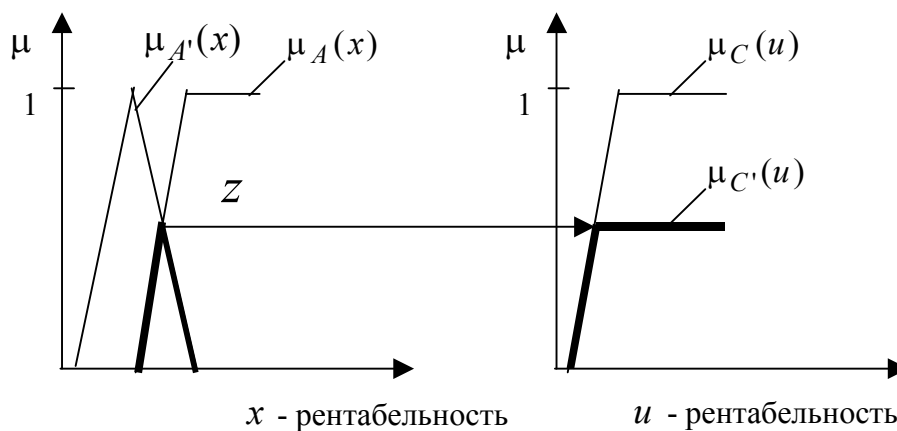


Рис. 6. Иллюстрация расчета  $\mu_{C'}(u)$ .

### Сложные правила базы знаний

1. Множественные заключения:

$$\text{if } A \text{ then } C_1 \text{ and } C_2 \dots \text{ and } C_n. \quad (9)$$

Это правило эквивалентно нескольким правилам с одним заключением:

if  $A$  then  $C_1$

if  $A$  then  $C_2$

....

if  $A$  then  $C_n$ .

Для каждого из этих правил можно применить формулы (4) – (8).

2. Множественные посылки:

$$\text{if } A_1 \text{ and } A_2 \dots \text{ and } A_n \text{ then } C \quad CF_r \quad (10)$$

$$A'_1 \quad CF_{f1}$$

...

$$A'_n \quad CF_{fn}$$

---


$$C' \quad CF_{C'}$$

Правило срабатывает, если имеют место факты  $A'_1, \dots, A'_n$ . При этом, если посылка  $A_i$  – четкая, то факт должен совпадать с посылкой, т.е.  $A'_i = A_i$ ;

если посылка  $A_i$  – нечеткая, то факт  $A'_i$  может не совпадать с посылкой.

Здесь возможны следующие варианты:

а)  $C$  – четкое заключение.

В этом случае  $C'=C$ . Фактор уверенности заключения рассчитывается по формуле:

$$CF_c = \min(k_1 CF_{f1}, \dots, k_n CF_{fn}) \cdot CF_r, \quad (11)$$

$$k_i = \begin{cases} 1, & \text{если } A_i \text{ – четкая посылка,} \\ S_i \text{ (мера подобия (6)),} & \text{если } A_i \text{ – нечеткая посылка.} \end{cases}$$

б)  $C$  – нечеткое заключение.

В этом случае нечеткое множество  $C'$  определяется пересечением нечетких множеств  $C_i$ :

$$C' = C_1' \cap C_2' \dots \cap C_n', \quad (12)$$

где  $C_i'$  – фактическое нечеткое заключение простого правила if  $A_i$  then  $C$  и факта  $A'_i$  (см. простые правила CRISP\_ и FUZZY\_FUZZY).

Функция принадлежности пересечения нечетких множеств (12) определяется следующим образом:

$$\mu_{C'}(x) = \min(\mu_{C_1'}(x), \dots, \mu_{C_n'}(x)). \quad (13)$$

Фактор уверенности для этого случая рассчитывается по формуле:

$$CF_c = \min(CF_{f1}, \dots, CF_{fn}) \cdot CF_r. \quad (14)$$

*Пример.* Пусть задано правило:

if  $A_1$  and  $A_2$  then  $C$ ,

$A_1, A_2, C$  – нечеткие множества,  $CF_{f1}=0.7, CF_{f2}=0.8, CF_r=0.9$ . На рис. 7 показана схема формирования фактического нечеткого заключения  $C'$  с функцией принадлежности  $\mu_{C'}(x)$  (см. вариант 2 б).

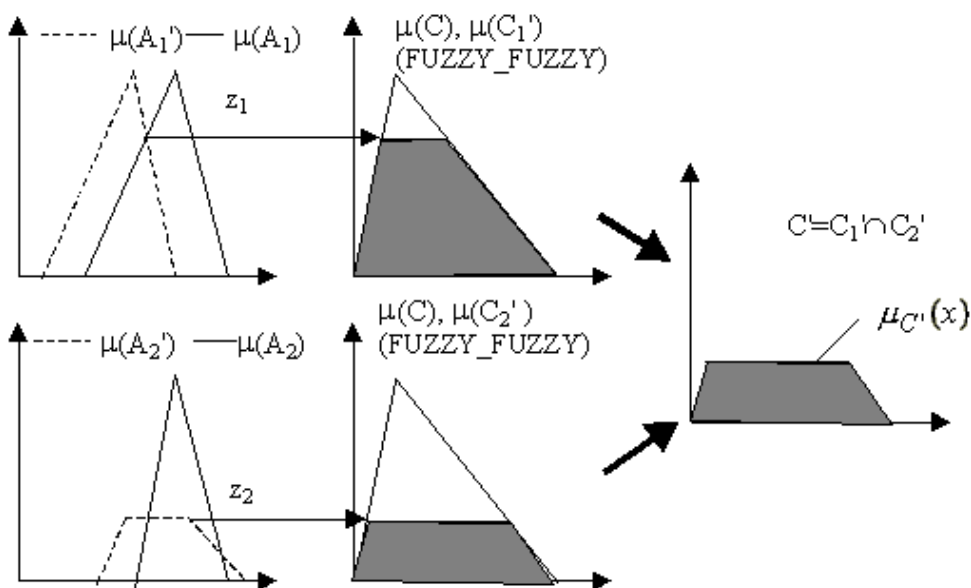


Рис. 7. Схема формирования фактического нечеткого заключения  $C'$ .

Из (14) следует, что фактор уверенности фактического нечеткого заключения  $C'$  равен

$$CF_c = \min(0.7, 0.8) \cdot 0.9 = 0.63.$$

### Объединение нечетких фактов

Пусть уже имеется факт  $C_1'$  для некоторой нечеткой переменной. И в результате срабатывания какого-нибудь правила добавляется новый факт  $C_2'$  для той же нечеткой переменной. Тогда факты для одной нечеткой переменной объединяются в один факт  $C' = C_1' \cup C_2'$ , который имеет следующую функцию принадлежности:

$$\mu_{C'}(x) = \max(\mu_{C_1'}(x), \mu_{C_2'}(x)). \quad (15)$$

При этом фактор уверенности нового факта рассчитывается по формуле:

$$CF_c = \max(CF_{c1}, CF_{c2}),$$

где  $CF_{c1}$ ,  $CF_{c2}$  – факторы уверенности исходных фактов  $C_1'$  и  $C_2'$ .

*Пример.* На рис. 8 приведен пример расчета функции принадлежности факта  $C' = C_1' \cup C_2'$ .

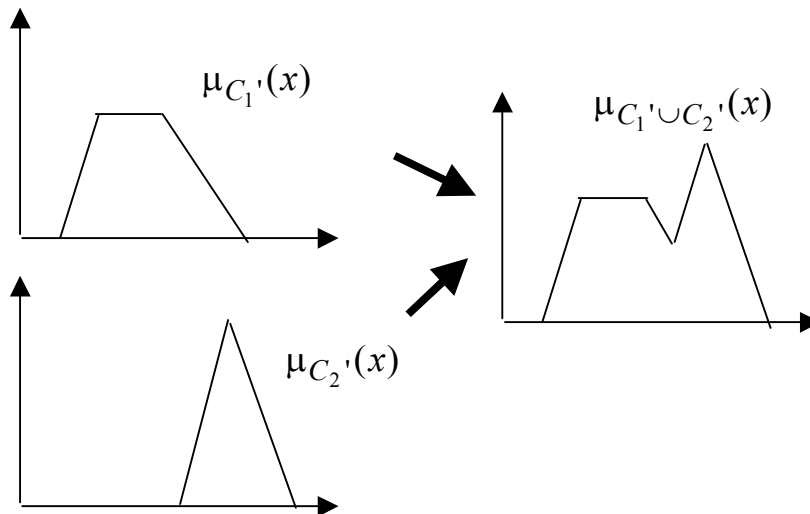


Рис. 8. Иллюстрация расчета функции принадлежности факта  $C' = C_1' \cup C_2'$ .

### Определение четкого значения по нечеткому множеству

Для выработки конкретного прогноза из нечеткого решения необходимо перейти от нечеткого множества к четкому значению. Для этого часто используется следующая формула:

$$x' = \frac{\int (x\mu(x))dx}{\int \mu(x)dx}, \quad (16)$$

где  $x'$  – рекомендуемое значение,  $\mu(x)$  – функция принадлежности соответствующего нечеткого множества.

Для кусочно-линейной функции принадлежности  $\mu(x)$  формулу (16) можно представить в следующем виде:

$$x' = \frac{\sum_i x_i' Q_i}{\sum_i Q_i}, \quad (17)$$

где  $x_i'$  – координата  $x$  центра фигуры под  $i$ -м отрезком прямой функции принадлежности;  $Q_i$  – площадь этой фигуры.

*Пример.* Расчет рекомендуемого значения, исходя из функции принадлежности по формуле (17), представлен на рис. 9. Из рис. 9 имеем

$$x' = \frac{1.67 \cdot 0.5 + 3.0 \cdot 2.0 + 4.67 \cdot 1.0}{0.5 + 2.0 + 1.0} = 3.29.$$

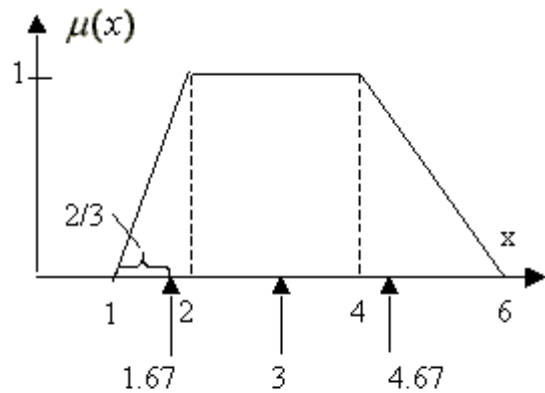


Рис. 9. Пример кусочно-линейной функции принад-

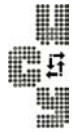
## Заключение

Приведена классификация правил базы знаний, которые используются в системе Clips и других оболочках, применяемых для разработки экспертных систем на основе правил продукции. Возможность представления в экспертных системах нечетких знаний является важным условием использования таких систем в медицине, экономике, политологии и других областях человеческой деятельности, где ненадежными являются не только факторы и заключения, но и сами правила продукции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks. М.: Горячая линия - Телеком, 2000.
2. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Изд-во физико-математической литературы, 2001.
3. Лавров К.Н., Цыплакова Т.П. Финансовая аналитика. MATLAB 6. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2001.
4. Тельнов Ю.Ф. Интеллектуальные информационные системы в экономике. М.: СИНТЕГ, 1998.
5. Элти Дж., Кумбс М. Экспертные системы: концепции и примеры. М.: Финансы и статистика, 1987.
6. Представление и использование данных / Под ред. Х. Уэно, М. Исидзука. М.: Мир, 1989.
7. Уотермен Д. Руководство по экспертным системам. М.: Мир, 1989.
8. Герман О.В. Введение в теорию экспертных систем и обработку знаний. М.: Дизайн-ПРО, 1995.
9. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений / А.Н. Борисов, А.В. Алексеев, Г.В. Меркурьева и др. М.: Радио и связь, 1989.





УДК 6283.621.3

© 2002 г. **В.Г. Косицын,**  
**В.А. Соловьев,** канд. техн. наук  
(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет)

## **СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С НЕЧЕТКИМ МОДАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ**

Рассматривается алгоритм синтеза нечеткого модального регулятора для систем управления высокой сложности. Приведены результаты имитационного моделирования.

### **Введение**

В сложных системах управления, когда необходимо обеспечить высокую точность регулирования, рекомендуется применять модальное управление [1, 2]. Использование данного принципа управления позволяет получить желаемую форму переходного процесса, а также реализовать требуемый функционал качества. Но в то же время применение модального управления влечет за собой:

- жесткую привязанность параметров регулятора к параметрам системы и, как следствие, непредсказуемость работы системы управления при изменении параметров системы;
- неудовлетворительную работу системы управления при воздействии внешних возмущений;
- зачастую невозможность «наблюдения» всех координат системы.

Неудовлетворительную работу системы управления при воздействии внешних возмущений можно решить введением компенсационного канала, а невозможность «наблюдения» всех координат системы решается построением наблюдающего устройства. Но это повышает сложность проектирования и синтеза модального регулятора, приводит к увеличению количества звеньев в системе управления и снижает надежность ее работы.

Кроме того, жесткая привязанность параметров регулятора к параметрам системы приводит к тому, что при недостаточной точности математического описания объекта управления, при не учете звеньев с малыми постоянными времени или при каких-то других видах аппроксимации в системах, построенных по принципам модального управления с использованием на-