



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.

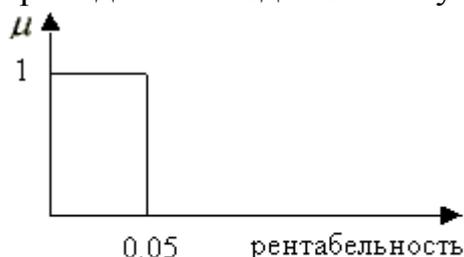


Рис. 1. Графическое представление четкого множе-

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

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

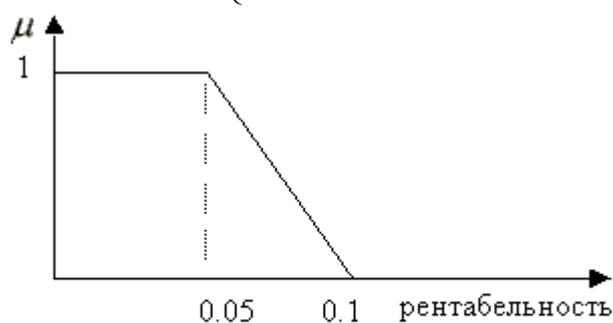


Рис. 2. Графическое представление нечеткого множества.

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.

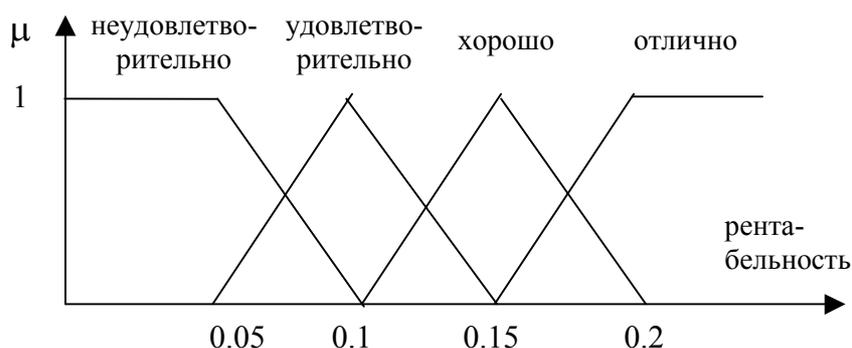


Рис. 3. Представление лингвистической переменной.

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.

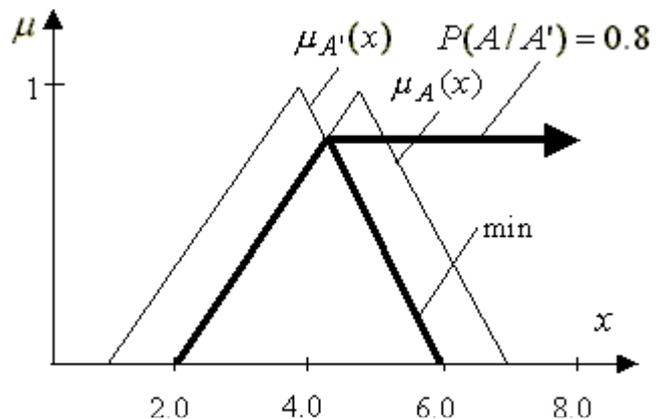


Рис. 4. Иллюстрация расчета

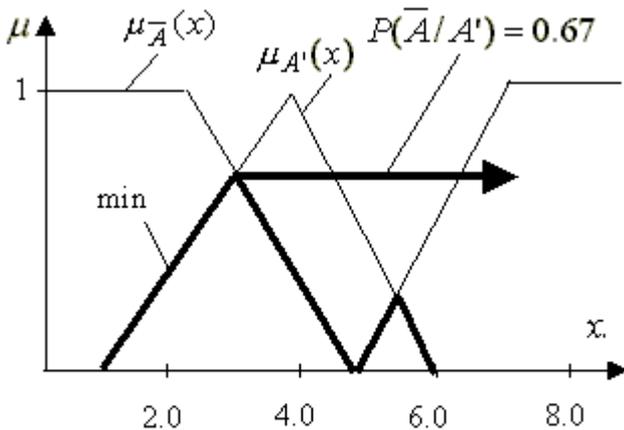


Рис. 5. Иллюстрация расчета

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).

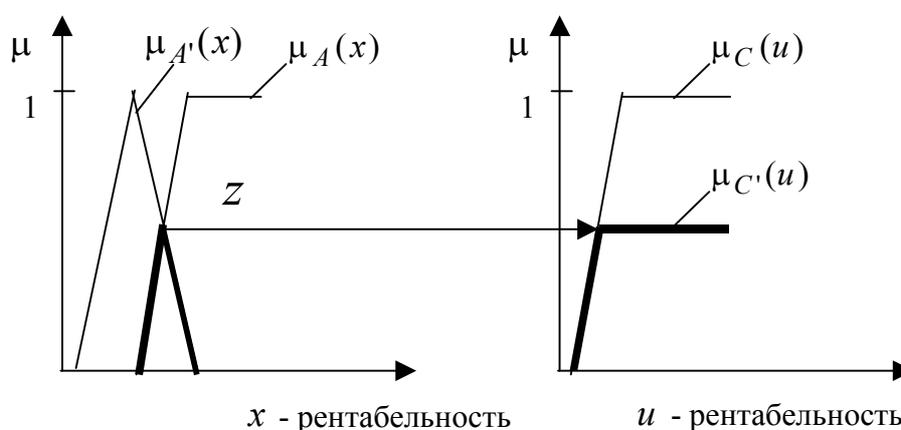


Рис. 6. Иллюстрация расчета $\mu_{C'}(u)$.

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).

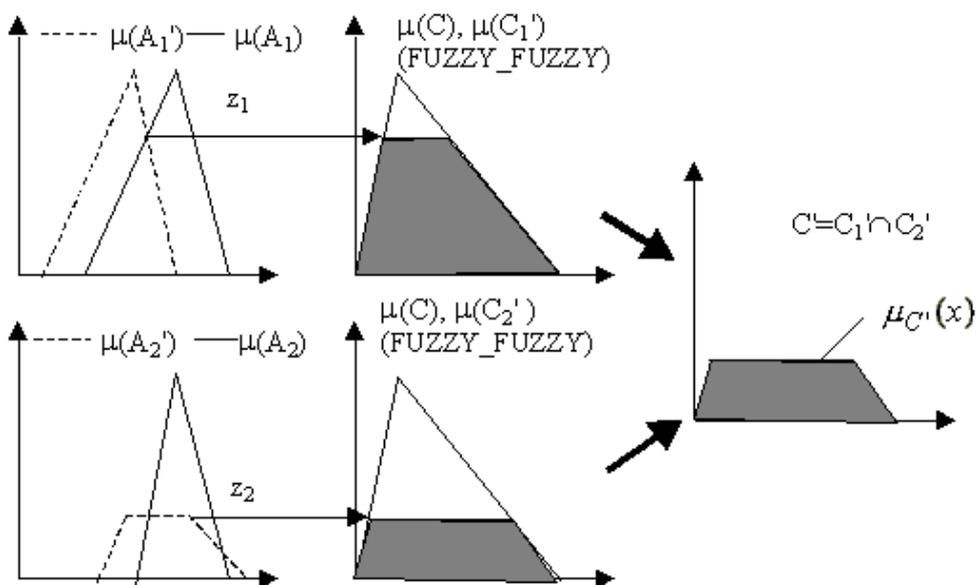


Рис. 7. Схема формирования фактического нечеткого заключения C' .

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 $C' = C_1' \cup C_2'$.

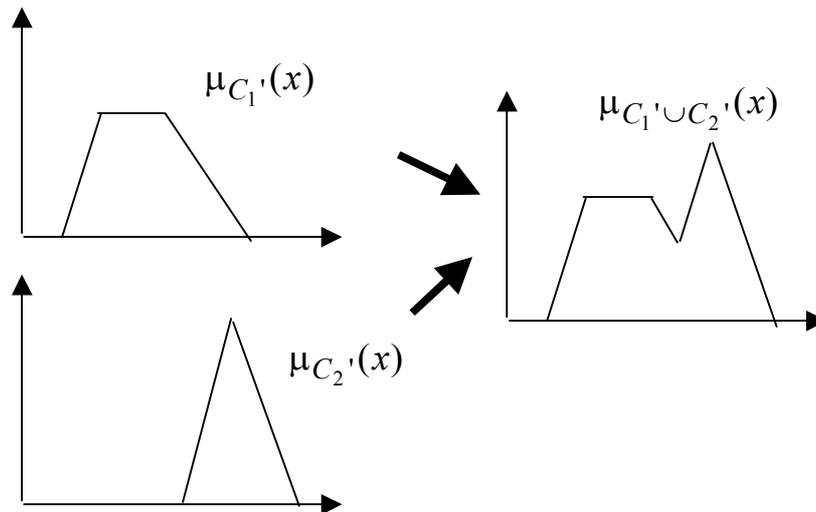


Рис. 8. Иллюстрация расчета функции принадлежности факта $C' = C_1' \cup C_2'$.

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

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

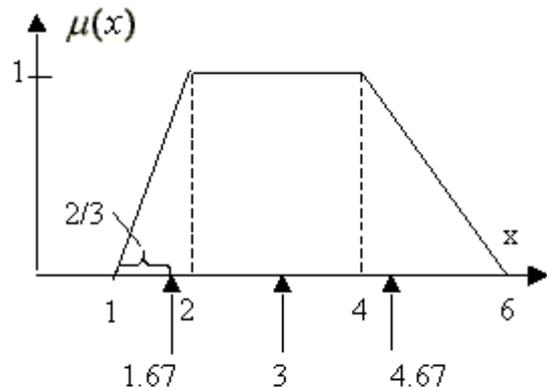


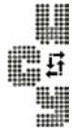
Рис. 9. Пример кусочно-линейной функции принад-

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-