*Д. т. н. Л. П. ВЕРШИНИНА*

Россия, С.-Петербургский гос. ун-т аэрокосм. приборостроения
E-mail: lva_k24@aanet.ru

Дата поступления в редакцию
16.02 2001 г.
Оппоненты *д. т. н. Е. А. ВОРОБЬЕВ,*
*д. т. н. Ю. А. ДОЛГОВ*

# АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

*Разработан алгоритм управления для нечеткого регулятора, осуществляющий аналитическую аппроксимацию нечеткого вывода с предварительным агрегированием нечеткой исходной информации.*

В последние годы интенсивно ведутся работы по практическому внедрению нечетких регуляторов (НР), нечетких экспертных систем (ЭС) и систем управления в промышленную и непромышленную сферы [1]. При этом по качеству переходных процессов и достижению целей управления НР превосходят традиционные П-, ПИ- и ПИД-регуляторы.

Проведенный обзор по НР и принципам их построения выявил следующее:

— применение НР позволяет использовать для управления технологическими процессами информацию качественного характера, которую невозможно формализовать при реализации традиционных законов регулирования. При этом НР оказывается малочувствительным к возмущениям в достаточно широком диапазоне и демонстрирует лучшие характеристики по сравнению с классическими регуляторами;

— для составления управляющих правил НР требуется интуиция разработчика и хорошее знание объекта управления, вследствие чего в литературе практически отсутствует какая-либо методика для непосредственного синтеза НР;

— существующие НР настраиваются на логику пользователя при помощи изменения функций принадлежности, причем выбор функций принадлежности является нетривиальной процедурой;

— не существует однозначных рекомендаций по выбору метода точной интерпретации нечеткого вывода;

— недостаточно освещена возможность применения НР для многомерного процесса.

Некоторые из указанных проблем позволяет решить разработанный *алгоритм синтеза нечеткого регулятора*.

В основе алгоритма функционирования НР лежит специализированная нечеткая логика, реализованная в классе нечетких правил типа

$$
\begin{array}{l}
\text{ЕСЛИ } x_{11}, x_{12}, \ldots, x_{1n}, \text{ ТО } u_1 \\
\text{ЕСЛИ } x_{21}, x_{22}, \ldots, x_{2n}, \text{ ТО } u_2 \\
\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
\text{ЕСЛИ } x_{m1}, x_{m2}, \ldots, x_{mn}, \text{ ТО } u_m,
\end{array}
\qquad (1)
$$

где $x_{ij}$ — значения входов $x_j$ (величина рассогласования между заданным и реальным значением выходной характеристики объекта, скорость изменения этой величины и т. д.);

$u_i$ — управления ( $i$=1, …, $m$; $j$=1, …, $n$).

В зависимости от диапазона изменения и точности измерения каждая из координат $x_{ij}$, $u_i$ описывается своим нечетким множеством с соответствующей функцией принадлежности.

Структура модели нечетких вычислений по совокупности правил (1) представлена на **рисунке**.

Обычно расчет управляющего воздействия $u_k$ осуществляется с помощью операции композиции:

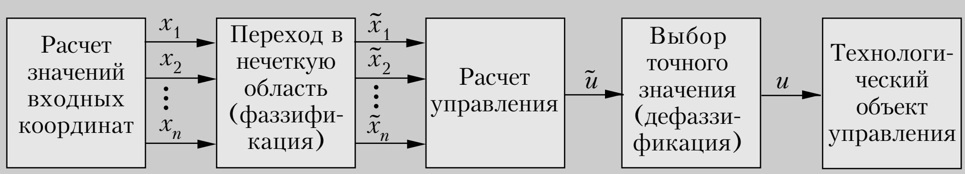
$$\tilde{u}_k = \tilde{x}_{k1} \circ \tilde{x}_{k2} \circ \ldots \circ \tilde{x}_{kn} \circ R, \ (k=m+1, m+2, \ldots),$$

где нечеткое отношение $R$ определяется как

$$R = \sum_{i=1}^{m} \tilde{x}_{i1} \times \tilde{x}_{i2} \times \ldots \times \tilde{x}_{in} \times \tilde{u}_i.$$

Затем из нечеткой формы $\tilde{u}_k$ выбирается точное значение.

Описанный алгоритм работает достаточно быстро при небольших значениях $n$ (1—3). Для многомерного входа расчет нечеткого отношения $R$ пред-




Структура модели нечетких вычислений

ставляет значительные трудности. В этом случае предлагается использовать следующий подход, методологическим отличием которого является *отсутствие использования нечеткого отношения*.

В теории нечетких множеств имеется возможность применять различные операции объединения, пересечения и дополнения множеств в зависимости от контекста, ситуации управления. Очевидно, что жесткие, однозначные операторы недостаточно полно отражают смысл многозначных преобразований нечетких переменных. Вместе с тем существуют гибкие параметризованные операторы, позволяющие агрегировать нечеткую информацию с учетом изменчивости ситуационных данных и настроиться на логику пользователя [2, 3].

В качестве такого оператора предлагается использовать обобщенный оператор осреднения

$$M_p(\mu_i, \ldots, \mu_n)=\sqrt[p]{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\mu_1^p}\,, \qquad (2)$$

где $\mu_i$ — функции принадлежности $x_i$.

Настройка на логику пользователя реализуется выбором параметра $p$:

при $p$=1 $M_1(\mu_i, \ldots, \mu_n)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\mu_i$ (*среднее арифметическое*),

при $p$=−1 $M_{-1}(\mu_1, \ldots, \mu_n)=\dfrac{1}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\mu_i}}$ (*среднее гармоническое*),

при $p$=0 $M_0(\mu_1, \ldots, \mu_n)=\sqrt[n]{\mu_1\cdot\ldots\cdot\mu_n}$ (*среднее геометрическое*),

при $p\to-\infty$ $M_{-\infty}(\mu_1, \ldots, \mu_n)=\min(\mu_1, \ldots, \mu_n)$,

при $p\to+\infty$ $M_{+\infty}(\mu_1, \ldots, \mu_n)=\max(\mu_1, \ldots, \mu_n)$.

Выбор того или иного значения параметра $p$ позволяет также варьировать степень нечеткости описания $x_i$.

Если $x_i$ определены для группы $q$ разнородных физических величин (характеристик процесса), т. е. $x_i=(x_i^1, x_i^2, \ldots, x_i^q)$, используем модификацию обобщенного оператора осреднения (2). В этом случае

$$\mu_i=\sqrt[p]{\frac{1}{qG_1}\sum_{l=1}^{q}g_{il}\mu_{il}^p}\,,$$

где $g_{il}$ — коэффициент значимости $l$-й характеристики;

$\mu_{il}$ — функция принадлежности $x_i^l$;

$$G_i=\sum_{l=1}^{q}g_{il}.$$

Агрегируя имеющуюся нечеткую информацию (1) с помощью обобщенного оператора осреднения (2), получаем множество точек $\{M_p^i, u_i\}$ в пространстве $[0,1]\times U$, где $M_p^i=M_p(\mu_1(x_{i1}), \mu_2(x_{i2}), \ldots, \mu_n(x_{in}))$, $u_i$ — заданные "четкие" значения управлений, $i$=1, …, $m$.

Для построения аналитической зависимости $u=f(M_p)$ используем сплайн-интерполяцию [4]. Не умаляя общности, считаем, что $M_p^1<M_p^2<\ldots<M_p^m$. Строим кубический интерполяционный сплайн $S_3([0, 1], M_p)$, принимающий в заданных точках $\{M_p^i\}$ заданные значения $\{u_i\}$. Сплайн склеен на [0,1] из кубических многочленов, имеет непрерывную вторую производную и удовлетворяет следующим условиям в концевых точках: $S_3''([0,1], 0)=y''(0)$, $S_3''([0,1], 1)=y''(1)$, где $y''(M_p)$ — оценка $f''(M_p)$ по точкам $M_p^i$.

Пусть задан вход $x_k=(x_{k1}, x_{k2}, \ldots, x_{kn})$. По формуле (2) определяем $M_p^k$. Значение управления $u_k$ находим из соотношения

$$u_k=S_3([0,1], M_p^k).$$

***

Предложенный алгоритм аналитической аппроксимации нечеткого вывода с предварительным агрегированием нечеткой исходной информации позволяет производить быстрый и качественный вывод на нечетких множествах. Алгоритм не использует нечетких отношений, поэтому его применение особенно эффективно в случае многомерного входа, когда требуется оперировать многомерными матрицами нечетких отношений.

В известных аналитических методах синтеза нечетких регуляторов аппроксимация нечетких отображений осуществляется в пространстве $X\times U$. В данном алгоритме исходная нечеткая информация предварительно агрегируется с помощью обобщенного оператора осреднения $M_p$:

$$X\times U \xrightarrow{M_p} [0,1]\times U,$$

а затем уже в пространстве $[0,1]\times U$ осуществляется аналитическая аппроксимация, что упрощает поиск требуемого управления.

Особенностью предложенного алгоритма является также возможность адаптации к нечеткостям и настройка на логику пользователя.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Прикладные нечеткие системы / Под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно.— М. : Мир, 1993.

2. Аверкин А. Н., Головина Е. Ю., Сергиевский А. Е. Проектирование нечетких регуляторов на основе триангулярных норм // Изв. АН СССР. Сер. Теория и системы управления.— 1997.— № 5.— С. 112—118.

3. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д. А. Поспелова.— М. : Наука, 1986.

4. Стечкин С. Б., Субботин Ю. Н. Сплайны в вычислительной математике.— М. : Наука, 1976.