



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-

блюдателя, число параметров регулятора, подлежащих корректировке, становится значительным, из-за чего процесс настройки регулятора трудоемок и требует высокой профессиональной подготовки.

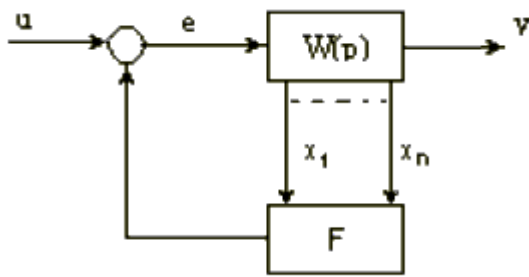


Рис.1. Функциональная схема системы с модальным регулятором.

В общем виде классическая система модального управления может быть изображена в виде функциональной схемы, приведенной на рис. 1.

Обозначения, приведенным на рисунке, соответствуют:  $W(p)$  – передаточная функция объекта;  $F$  – матрица строка коэффициентов модального регулятора;  $x_i, i=1,2,\dots,n$  – переменные состояния системы. При этом нахождение параметров модального регулятора производится

на основании решения уравнения Риккати

$$F = R^{-1} \cdot B^T \cdot K, \quad (1)$$

$$-K \cdot A - A^T \cdot K + K \cdot B \cdot R^{-1} \cdot B^T \cdot K - Q = 0, \quad (2)$$

где  $K$  – положительно определенная, симметричная матрица, которая определяется в результате решения уравнения Риккати (2);  $B$  – матрица управления;  $A$  – матрица состояния системы;  $F$  – матрица коэффициентов модального регулятора;  $R, Q$  – положительно определенные симметричные матрицы, которые задаются в соответствии с критерием качества.

### Задача синтеза нечеткого модального регулятора

Для ослабления влияния перечисленных недостатков модального регулятора предлагается последний реализовать на нечеткой основе. На рис. 2 приведена функциональная схема системы с нечетким модальным регулятором (НМР).

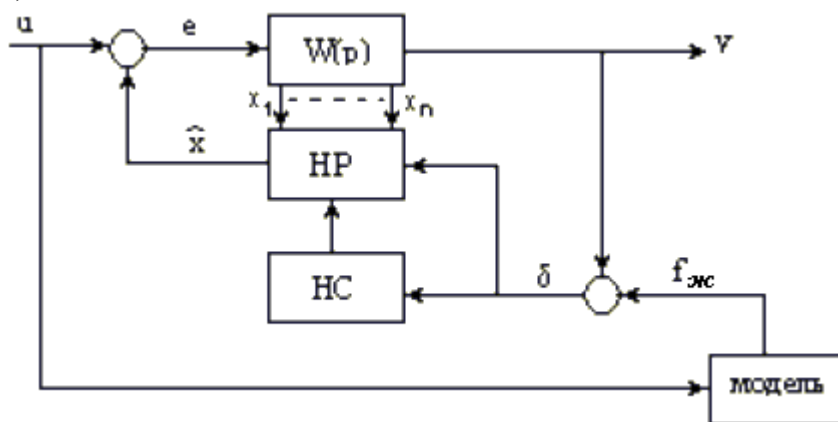


Рис.2. Общий вид системы с нечетким модальным регулятором.

Обозначения, приведенным на рис. 2 соответствуют: «модель» – модель объекта управления;  $W(p)$  – передаточная функция объекта; НР – не-

четкий регулятор; НС – нейронная сеть;  $u$  – управляющее воздействие;  $e$  – ошибка регулирования;  $y$  – выход системы;  $f_{жс}$  – желаемая характеристика переходного процесса;  $\delta$  – ошибка регулирования;  $\hat{x}$  – управляющее воздействие НР.

Синтез параметров НР будем осуществлять из условия достижения системой асимптотической устойчивости [3]. Для этого зададимся функционалом качества вида:

$$J = \int_0^{\infty} \left( \sum_{i=1}^n (\Psi_i(\bar{x})^2 + \dot{\Psi}_i(\bar{x})^2) \right) dt, \quad (3)$$

где  $\Psi, \dot{\Psi}$  – некоторые непрерывные функции.

Пусть модель объекта управления определена в виде:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}} = \bar{A} \cdot \bar{x} + \bar{B} \cdot \bar{u}, \\ y = \bar{C}^T \cdot \bar{x}, \end{cases}$$

где  $\bar{A}$  – матрица состояния;  $\bar{B}$  – матрица управления;  $\bar{C}$  – матрица выхода;  $\bar{x}$  – вектор переменных состояния системы;  $\dot{\bar{x}}$  – вектор производных переменных состояния системы;  $\bar{u}$  – вектор управляющих воздействий;  $y$  – вектор выхода системы.

Для решения задачи предположим, что

$$\Psi_i = \delta_i + \alpha \cdot \dot{\delta}_i,$$

тогда

$$\dot{\Psi}_s = \frac{\partial \Psi_s}{\partial x_1} \cdot \dot{x}_1 + \frac{\partial \Psi_s}{\partial x_2} \cdot \dot{x}_2 + \dots + \frac{\partial \Psi_s}{\partial x_n} \cdot \dot{x}_n = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \Psi_s}{\partial x_i} \cdot f_{i1} + \frac{\partial \Psi_s}{\partial x_s} \cdot x_s.$$

При этом для минимизации функционала (3) необходимо обеспечить выполнение условия

$$\Psi_s + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \Psi_s}{\partial x_i} \cdot f_{i1} + \frac{\partial \Psi_s}{\partial x_s} \cdot x_s = 0,$$

при котором искомое управление будет иметь вид

$$x_s = - \left[ \frac{\partial \Psi_s}{\partial x_s} \right]^{-1} \left[ \Psi_s + \sum_{i=1}^n \frac{\partial \Psi_s}{\partial x_i} \cdot f_{i1} \right],$$

а условием реализуемости данного управления будет служить соотношение

$$\frac{\partial \Psi_s}{\partial x_s} \neq 0.$$

Реализация искомого управления имеет решение только при неизменных значениях как параметров объекта, так и параметров модели. Однако, используя адаптационные свойства НР, данное управление может быть реализуемо и при варьируемых параметрах системы. При этом для усиления адаптационных свойств НР последний может быть снабжен корректирующей

щей НС, в функцию которой входит коррекция как вида функций принадлежности регулятора, так и изменение параметров базы знаний.

### Иллюстративный пример

Рассмотрим применение описанного алгоритма построения НМР на конкретном примере. В качестве объекта регулирования примем широко известную в литературе систему электропривода с двух массовым упруго вязким объектом [4], математическое описание объекта имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}} = \bar{A} \cdot \bar{x} + \bar{B} \cdot \bar{u}, \\ y = \bar{C}^T \cdot \bar{x}, \end{cases} \quad \dot{\bar{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix}, \quad \bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}, \quad \bar{u} = \begin{bmatrix} u \\ x \end{bmatrix}, \quad \bar{C}^T = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{IE}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{M1}} & -\frac{\beta}{T_{M1}} & -\frac{1}{T_{M1}} & -\frac{\beta}{T_{M1}} \\ 0 & \frac{1}{T_C} & 0 & -\frac{1}{T_C} \\ 0 & \frac{\beta}{T_{M2}} & \frac{1}{T_{M2}} & -\frac{\beta}{T_{M2}} \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{IE}} & -\frac{1}{T_{IE}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для данного объекта было найдено желаемое управление:

$$x = C_1 \cdot x_1 + C_2 \cdot x_2 + C_3 \cdot x_3 + C_4 \cdot x_4 + C_5 \cdot F + u,$$

где коэффициенты были определены следующим образом:

$$F = f' + \alpha \cdot f'' + f''' + \alpha \cdot f'''';$$

$$C_1 = T_{IE} + \frac{T_{IE}}{\alpha} - \frac{T_{IE}}{T_{M1}} \cdot \beta + \frac{T_{IE}}{T_C} \cdot \frac{1}{\beta} - \frac{T_{IE}}{T_{M2}} \cdot \beta;$$

$$C_2 = -T_{IE} \cdot \beta - \frac{T_{IE}}{\alpha} \cdot \beta + \frac{T_{IE}}{T_{M1}} \cdot \beta^2 - 2 \cdot \frac{T_{IE}}{T_C} + \frac{T_{IE} \cdot T_{M1}}{T_C \cdot \beta} + \frac{T_{IE} \cdot T_{M1}}{T_C \cdot \alpha \cdot \beta} -$$

$$- \frac{T_{IE} \cdot T_{M1}}{T_C} + \frac{T_{IE} \cdot T_{M1}}{\alpha} - \frac{T_{IE} \cdot T_{M1} \cdot \beta}{T_{M2}} + \frac{T_{IE} \cdot T_{M1}}{T_{M2}^2} \cdot \beta^2 - \frac{T_{IE} \cdot T_{M1}}{T_C \cdot T_{M2}} -$$

$$- \frac{T_{IE} \cdot T_{M1}}{T_{M2} \cdot \alpha} \cdot \beta;$$

$$C_3 = \frac{T_{IE} \cdot T_{M1}}{\alpha \cdot \beta} - \frac{T_{IE} \cdot T_{M1}}{T_{M2}} + \frac{T_{IE} \cdot T_{M1}}{T_{M2}^2} \cdot \beta - \frac{T_{IE} \cdot T_{M1}}{T_C \cdot T_{M2} \cdot \beta} - \frac{T_{IE} \cdot T_{M1}}{T_{M2} \cdot \alpha} - T_{IE} - \frac{T_{IE}}{\alpha} + \frac{T_{IE} \cdot \beta}{T_{M1}} - \frac{T_{IE}}{T_C \cdot \beta};$$

$$C_4 = -T_{IE} \cdot \beta - \frac{T_{IE} \cdot \beta}{\alpha} + \frac{T_{IE} \cdot \beta^2}{T_{M1}} + 2 \cdot \frac{T_{IE} \cdot \beta^2}{T_{M2}} - \frac{T_{IE} \cdot T_{M1}}{T_C \cdot \beta} - \frac{T_{IE} \cdot T_{M1}}{T_C \cdot \alpha \cdot \beta} + \frac{T_{IE} \cdot T_{M1}}{T_C} - \frac{T_{IE} \cdot T_{M1}}{\alpha} + \frac{T_{IE} \cdot T_{M1} \cdot \beta}{T_{M2}} - \frac{T_{IE} \cdot T_{M1}}{T_{M2}^2} \cdot \beta^2 + \frac{T_{IE} \cdot T_{M1}}{T_C \cdot T_{M2}} + \frac{T_{IE} \cdot T_{M1} \cdot \beta}{T_{M2} \cdot \alpha};$$

$$C_5 = -\frac{T_{IE} \cdot T_{M1} \cdot T_{M2}}{\alpha \cdot \beta}.$$

Исследование рассматриваемой системы осуществлялось моделированием ее в среде MatLab 5.2, при этом в качестве численных значений параметров объекта были приняты:  $T_{M1} = 1.1c$ ;  $T_{M2} = 0.4c$ ;  $T_C = 0.0616c$ ;  $\beta = 0.236$ ;  $T_{IE} = 0,01c$ .

На рис. 3 приведены результаты моделирования описанной выше системы с модальным регулятором и системы с НМР.

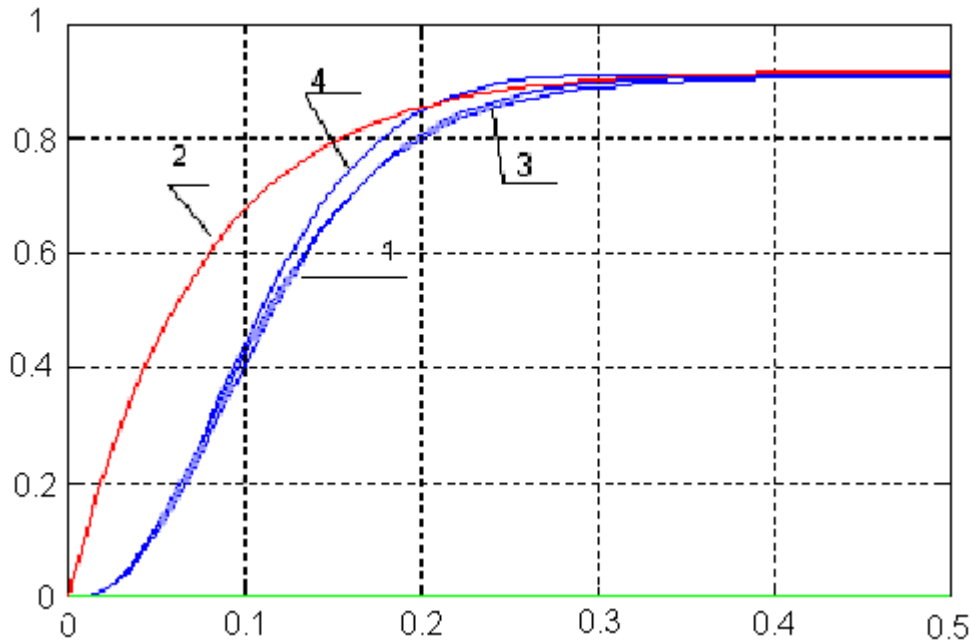


Рис. 3. Результаты моделирования.

Графики, приведенные на рис. 3, отражают реакцию системы на скачок управляющего воздействия, при этом кривая 1 характеризует реакцию системы с модальным регулятором, кривая 2 – с НМР, кривая 3 – с модальным

регулятором при увеличении  $\beta$ , кривая 4 – с модальным регулятором при уменьшении  $T_{M2}$ .

Анализ результатов моделирования показывает, что даже незначительное отличие параметров (например –  $\beta$  и  $T_{M2}$ ) модели и объекта регулирования приводит к изменению параметров переходного процесса при классическом построении модального регулятора. Эти же изменения параметров при предлагаемом способе построения НМР не оказывают никакого существенного влияния на характеристики переходного процесса (при моделировании все кривые сливаются в одну, кривая 2).

### Заключение

Использование нечеткого подхода при синтезе систем модального управления позволяет устранить слабые стороны модального управления. Наличие корректирующей нейронной сети в контуре нечеткого модального регулятора придает системе регулирования дополнительные адаптационные свойства, обеспечивающие получение желаемого переходного процесса, несмотря на изменения параметров системы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Проников А.С.* Программный метод испытаний металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1985. *Кузовков Н.Т.* Модальное управление и наблюдающее устройство. М.: Машиностроение, 1976.
2. *Постников Ю.В. Соколовский Г.Г.* Автоматизированные системы управления электроприводами с упругостью. Л.: Ротапринт ЛЭТИ, 1990.
3. Техническая кибернетика / Под ред. *В.В. Солодовникова*. М.: Машиностроение, 1967.
4. *Кепперман А.В.* Физический макет двух массовой упругой системы // Известия ЛЭТИ. 1974. Вып. 151. С.67-71.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Чье Ен Уном.*