

УДК 621.316

О. А. Онищенко, д-р техн. наук

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ НЕЧЕТКИЙ РЕГУЛЯТОР

Представлена новая методика построения структуры и базы правил нечеткого ПИД-регулятора для электромеханических систем. Основное отличие методики от известных заключается в универсальности предлагаемой базы правил, усиленных свойствах робастности системы при относительной простоте технической реализации регулятора.

Ключевые слова: нечеткий регулятор, робастность, электромеханическая система, база правил.

О. А. Onishchenko, ScD.

AN UNIVERSAL FUZZY CONTROLLER

A new method construction of structures and the rule base of fuzzy PID controller for electromechanical systems. The main difference from known technique lies in the universality of the proposed rule base, enhanced robustness properties of the system and the relative simplicity of technical realization of the regulator.

Keywords: fuzzy control, robustness, electromechanical system, the base rules.

О. А. Онищенко, д-р техн. наук

УНІВЕРСАЛЬНИЙ НЕЧІТКИЙ РЕГУЛЯТОР

Представлено нову методику побудови структури і бази правил нечіткого ПІД-регулятора для електро-механічних систем. Основна відмінність методики від відомих полягає в універсальності запропонованої бази правил, посилені властивостях робастності системи при відносній простоті технічної реалізації регулятора.

Ключові слова: нечіткий регулятор, робастність, електро-механічна система, база правил.

Для электромеханических систем (ЭМС) диапазоны вариации параметров объекта управления и нагрузок обычно известны, они определяют показатели качества динамических процессов. При таких условиях задача обеспечения робастности ЭМС достаточно узка и может быть решена формированием нелинейных характеристик регуляторов. Приняв, что характеристики регуляторов функционально зависят от амплитуды и скорости изменения ошибки регулирования, можно перейти к системам с нечетким управлением [1, 2]. Известно: а) нечеткое управление обладает свойствами робастности; б) объединение нескольких нечетких регуляторов (НР) позволяет получить хороших динамических свойств ЭМС; в) небольшое число правил НР придает улучшенные свойства обобщения [1–3].

Современные нечеткие микроконтроллеры (МК) имеют полную поддержку ввода/вывода переменных, систему команд для всех этапов фаззификации, логического заключения и дефаззификации. Основная сложность применения нечеткого МК для конкретной ЭМС заключена в разработке эффективной базы правил.

© Онищенко О.А., 2012

Число правил зависит от числа входных переменных и числа значений лингвистических переменных (нечетких множеств). Например, реализация нечеткого ПИД-регулятора требует записи трехмерной таблицы правил (количество правил, при одинаковом числе терм-элементов по входам, определяется, как число лингвистических переменных в степени числа входных переменных), что даже с помощью экспертов чрезвычайно сложно осуществить для конкретного технологического объекта управления [2–4].

Целью статьи является представление методики построения достаточно простого и универсального алгоритма функционирования нечеткого регулятора.

Обычно НР представляют собой многоканальные системы, содержащие, например, П-, И- и Д-каналы. Одна из наиболее универсальных схем i -канального соединения НР представлена на рис. 1

Рассмотрим двухканальный регулятор, содержащий два НР – $F1$ и $F2$.

Считаем, что: передаточные функции $W_{11}(s)$, $W_{21}(s)$ и $W_{12}(s)$, $W_{22}(s)$ входных термов \bar{x} – масштабирующие, пропорциональные звенья; входных сигналов два – $x_{11}(s) = x_{12}(s)$

и $x_{21}(s) = x_{22}(s)$, причем первый из них является ошибкой регулирования $\varepsilon(s)$, а второй – производной $s \cdot \varepsilon(s) \Rightarrow d\varepsilon(\tau)/d\tau$ от ошибки; передаточная функция $W_{31}(s)$ первого НР осуществляет пропорциональное усиление, а второго НР $W_{32}(s)$ – операцию интегрирования с постоянной времени T_u ; нелинейные коэффициенты передачи K_{1F1} , K_{2F1} и K_{1F2} , K_{2F2} нечетких регуляторов по каждому из термов $x_1(s), \dots, x_4(s)$ линеаризованы.

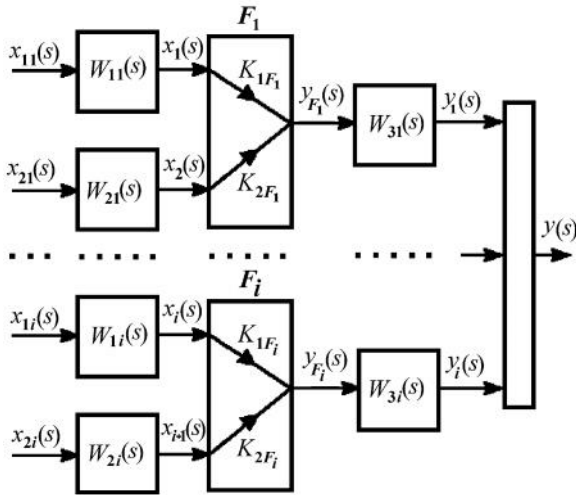


Рис. 1. Многоканальный нечёткий регулятор с двумя входами и одним выходом

При этих условиях можно записать

$$\left. \begin{aligned} W_{11}(s) &= k_{П1}; W_{21}(s) = k_{Д1}; W_{12}(s) = k_{П2}; \\ W_{22}(s) &= k_{Д2}; \varepsilon(\tau) \Rightarrow \varepsilon(s) = x_{11}(s) = x_{12}(s); \\ d\varepsilon(\tau)/d\tau &\Rightarrow s \cdot \varepsilon(s) = x_{21}(s) = x_{22}(s); \\ K_{1F1} &= \frac{\partial F_1(\tau)}{\partial x_1(\tau)}; K_{2F1} = \frac{\partial F_1(\tau)}{\partial x_2(\tau)}; K_{1F2} = \frac{\partial F_2(\tau)}{\partial x_3(\tau)}; \\ K_{2F2} &= \frac{\partial F_2(\tau)}{\partial x_4(\tau)}; W_{31}(s) = k_n; W_{32}(s) = \frac{1}{s \cdot T_u}. \end{aligned} \right\} (1)$$

Из (1), согласно рис. 1, получим

$$\left. \begin{aligned} y_1(s) &= \varepsilon(s) \cdot k_{П1} \cdot K_{1F1} \cdot k_{П} + s \cdot \varepsilon(s) \cdot k_{Д1} \cdot K_{2F1} \cdot k_{П}; \\ y_2(s) &= \varepsilon(s) \cdot k_{П2} \cdot K_{1F2} \cdot \frac{1}{s \cdot T_u} + \varepsilon(s) \cdot k_{Д2} \cdot K_{2F2} \cdot \frac{1}{T_u}; \\ y(s) &= y_1(s) + y_2(s), \end{aligned} \right\} (2)$$

откуда передаточная функция НР

$$\begin{aligned} W_{HP}(s) &= \frac{y(s)}{\varepsilon(s)} = k_{П1} \cdot K_{1F1} \cdot k_{П} + k_{Д1} \cdot K_{2F1} \cdot \frac{1}{T_u} + \\ &+ k_{П2} \cdot K_{1F2} \cdot \frac{1}{s \cdot T_u} + s \cdot k_{Д2} \cdot K_{2F2} \cdot k_{П} \end{aligned} \quad (3)$$

соответствует передаточной функции

идеального ПИД–регулятора:

$$W_{HP}(s) = K_{nHP} + \frac{1}{s \cdot T_{uHP}} + s \cdot T_{dHP}, \quad (4)$$

где $K_{nHP} = k_{П1} \cdot K_{1F1} \cdot k_{П} + k_{Д2} \cdot K_{2F2} \cdot \frac{1}{T_u}$;

$T_{uHP} = T_u / (k_{П2} \cdot K_{1F2})$; $T_{dHP} = k_{Д1} \cdot K_{2F1} \cdot k_{П}$.

Считая, что входные термы разбиты на пять, а выходной – на семь множеств, представим совокупность правил в табличном виде для, например, одного из каналов НР – пропорционального (рис. 2).

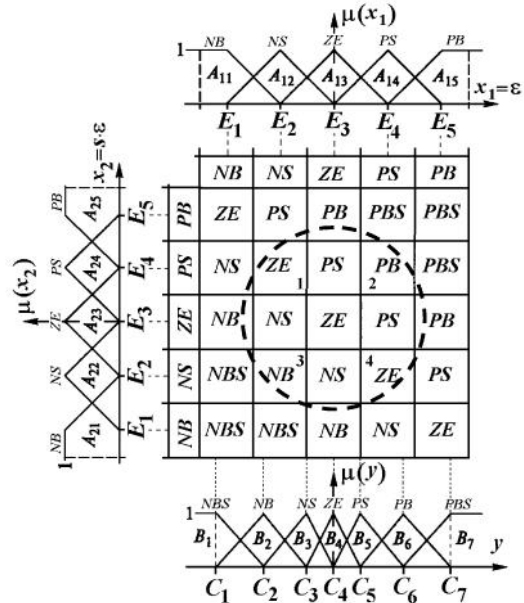


Рис. 2. Функции принадлежности и симметричная таблица правил для предлагаемого регулятора

Запись правил выхода формализуем, используя принцип *симметричной* записи логического вывода: путем разворота столбца переменной x_2 по вертикали по сравнению с общепринятым представлением для направлений столбцов таблиц [1–4]. Полученная таким образом таблица правил монотонна, что повышает устойчивость работы замкнутой ЭМС и учитывает выполнение очевидного условия $\varepsilon \cdot s \cdot \varepsilon < 0$ для установившегося режима (при $\varepsilon \in ZE$ и $s \cdot \varepsilon \in ZE$, $\varepsilon \rightarrow 0$ и $s \cdot \varepsilon \rightarrow 0$). Очевидно и то, что правила, записанные в центре таблицы (внутри окружности на рис. 2) обеспечивают установившийся и близкий к нему режим работы, а остальные правила обеспечивают переходные режимы, когда, например, для системы стабилизации скорости осуществляется ограничение момента. Установлено, что исключение правил

и смещение центров ФП, а в некоторых случаях и входных термов к области ZE повышают свойства робастности ЭМС с нечетким регулятором.

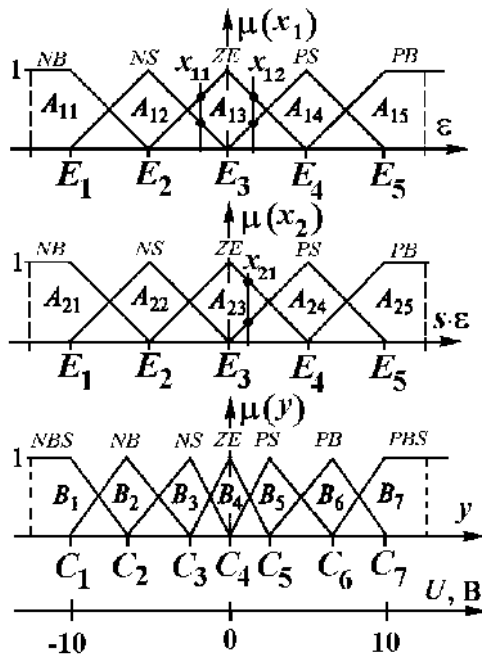


Рис. 3. Масштабирование термов НР и определение коэффициента K_{1F1}

Выходные сигналы регуляторов нормируются к уровню ± 10 В, поэтому выходной сигнал x_2 (производная от ошибки ε) не может превышать 10 В. Следовательно, масштабные коэффициенты $k_{Pi} = k_{Di} = 1$ (рис. 3).

Можно определить, например, для двух входных несмещенных симметричных треугольных термов и смещенного выходного треугольного терма (рис. 3) коэффициенты K_{1Fi} и K_{2Fi} НР. Указанные коэффициенты рассчитываются как отношения приращений сигналов выхода \bar{y} НР к приращениям сигналов входа \bar{x} – при малых отклонениях термов от установившегося движения, т.е. вблизи режима стабилизации выходной координаты.

Поскольку в рассматриваемом НР имеются два входа и один выход, то для любой комбинации входных фаззи-синглетонов результат импликации будет отличен от нуля лишь для четырех “активных” правил. То есть, при бесконечно малых входных сигналах коэффициент передачи НР стремится к бесконечно большому значению и тем самым вблизи точки стабилизации выходной переменной придает системе астатические свой-

ства. Используя аналогичный подход (как для x_{12} и x_{21}) при нормировании к уровню ± 10 В входных и выходного сигналов, можно рассчитать коэффициент усиления K_{1F1} НР для всего диапазона изменений $E_1 \dots E_5$ входных сигналов (рис. 4).

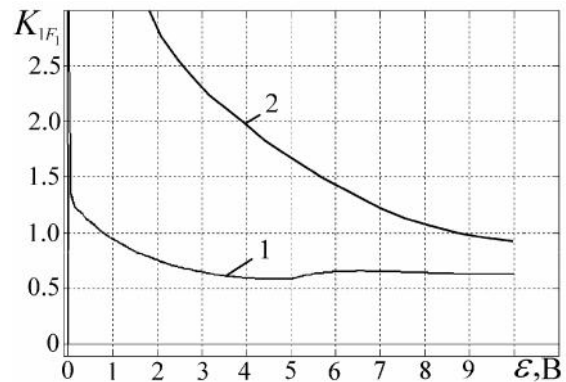


Рис. 4. Зависимости коэффициента передачи нечеткого регулятора по ошибке:
 1 – $s \cdot \varepsilon \rightarrow E_3$; 2 – $s \cdot \varepsilon \rightarrow E_5$

Очевидно, что если таблица правил и выходные термы симметричны, входные термы симметричны и число их равное, то для этого случая $K_{1F1} = K_{1F2}$.

Следовательно, если установить в каждый из каналов двухканального, по сути реализующего адаптивные свойства, нечеткого ПИД-регулятора (рис. 1 два абсолютно одинаковых НР с одинаковыми масштабными коэффициентами k_{Pi} и k_{Di} , то результирующую структурную схему можно упростить, устранив НР в одном из каналов.

С учетом масштабирования сигналов и их ограничения по уровню напряжения такая схема приведена на рис. 5.

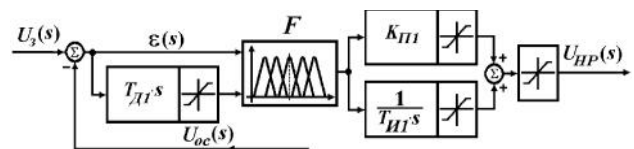


Рис. 5. Структурная схема нечеткого ПИД-регулятора

Реакция на единичный скачок (при $T_{D1}=1$ с, $T_{I1}=0,04$ с и $K_{P1}=5$, операция дифференцирования – реальная, с постоянной времени 0,001 с), полученная в результате моделирования и приведенная на рис. 6, подтверждает ПИД свойства НР с ограничением на уровне ± 10 В.

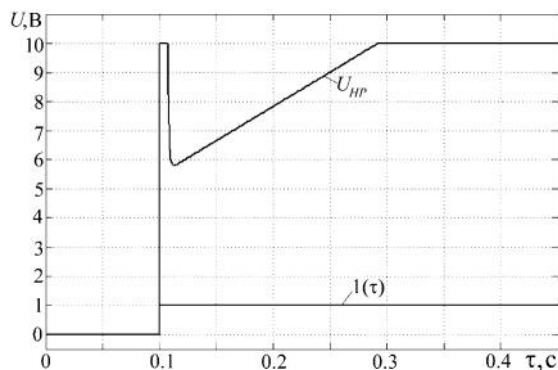


Рис. 6. Реакция нечеткого ПИД-регулятора на единичный скачок

Выводы: *а)* используя подобие выражений (3) и (4), можно отказаться от метода настройки НР путем экспертного подбора его параметров, приняв за основу параметры ПИД-регулятора, рассчитанные для номинальных условий работы ЭМС; *б)* при описанном решении записанные правила (рис. 2) придают НР свойства робастности; *в)* формирование нелинейных свойств НР осуществляется смещением центров C_i выходных термов.

Список использованной литературы

1. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учебник / под ред. Н. Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 744 с.
2. European Network for Fuzzy Logic and Uncertainty Modeling in Information Technology. [Electronic resource]: <http://www.erudit.de>.
3. Leften H. T. Fuzzy and Neural Approaches in Engineering / H. T. Leften, R. E. Uhrig, L. A. Zadeh. – John Wiley & Sons, Inc., 1997. – 600 p.
4. Leften H. T. Fuzzy and Neural Approaches in Engineering, MATLAB Supplement / H. T. Leften, R. E. Uhrig, L. A. Zadeh. – Paperback, June 1997. – 224 p.

Получено 14.06.2012

References

1. Methods of robust, Neuro-Fuzzy and adaptive control: a tutorial / Edited by N.D. Yegupova. – Moscow: Publishing MSTU Bauman, 2002. – 744 p. [in Russian].
2. European Network for Fuzzy Logic and Uncertainty Modeling in Information Technology. [Electronic resource]: <http://www.erudit.de>. [in German].
3. Leften H. T. Fuzzy and Neural Approaches in Engineering / H. T. Leften, R. E. Uhrig, L. A. Zadeh – John Wiley & Sons, Inc., 1997 – 600 p. [in English].
4. Leften H. T. Fuzzy and Neural Approaches in Engineering, MATLAB Supplement / H. T. Leften, R. E. Uhrig, L. A. Zadeh – Paperback, June 1997 – 224 p. [in English].



Онищенко
Олег Анатольевич,
д-р техн. наук, проф.
каф. электротехники
и электронных устр.
Одесской госуд. ака-
демии холода.
Тел.: (048) 720-91-71