

УДК 681.51.011

Г.В. Масютина, В.Ф. Лубенцов

### СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

*В работе предложен подход к структурно-параметрическому синтезу адаптивной системы управления и стабилизации сложного объекта на основе методов нечеткой логики и переменной структуры. Полученные результаты исследований системы подтверждают повышение эффективности управления, что в условиях возрастающей сложности объектов и процессов является актуальным.*

*Система; нечеткая логика; адаптивное управление; корректирующее воздействие; ПИД-регулятор.*

G.V. Masyutina, V.F. Lubenzov

### STRUCTURED-PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE ADAPTIVE CONTROL SYSTEM BASED ON THE FUZZY LOGIC

*The approach to structured-parametric synthesis of the adaptive control system of the complex object based on the methods of the fuzzy logic and variable structure is offered. The received results of research of system confirm increase of a management efficiency, that in conditions of growing complexity of objects and processes is actual.*

*System; fuzzy logic; adaptive control; correcting influence; PID-controller.*

Современные методы построения систем автоматического управления основаны на использовании строгих математических моделей объектов. Однако для подавляющего большинства динамических систем построение точных математических моделей практически невозможно ввиду их плохой формализуемости. К тому же, эти системы могут функционировать в среде, свойства которой изменяются или же вообще не могут быть определены заранее. Структурно-параметрический синтез таких систем возможен на основе аппарата нечеткой логики и принципов переменной структуры, что при ограниченной информации позволяет упростить структуру системы, сохраняя общие принципы адаптивного и робастного управления. Согласно этим принципам в основном контуре синтезируемой системы управления использован регулятор с аппроксимирующей непрерывной нелинейной функцией (АНФ-регулятор), который обладает определенной эффективностью по сравнению с обычными релейными и многопозиционными регуляторами [1], а в качестве корректирующего устройства к АНФ-регулятору, как показали предварительные исследования [2], целесообразно использовать нечеткий регулятор (фаззи-корректор). В качестве примера АНФ-регулятора можно привести аппроксимированный нелинейный закон управления  $U(\varepsilon) = F_1(\varepsilon) + F_2(\varepsilon) = M_1 \text{sign} \varepsilon + M_2 \text{sign}(\varepsilon - a)$  ( $\varepsilon$  – рассогласование между заданной  $g(t)$  и текущей регулируемой переменной  $x(t)$ ,  $F_1(\varepsilon)$  – релейная характеристика элемента без зоны нечувствительности “ $a$ ” (ЗН),  $F_2(\varepsilon)$  – релейная характеристика элемента с ЗН) функцией вида

$$F(\varepsilon) = M \cdot \sum_{i=0}^n \frac{\exp(\lambda \cdot (\varepsilon + i \cdot \alpha)) - \exp(-\lambda \cdot (\varepsilon - i \cdot \alpha))}{[1 + \exp(\lambda \cdot (\varepsilon + i \cdot \alpha))] \cdot [1 + \exp(-\lambda \cdot (\varepsilon - i \cdot \alpha))]},$$

где  $M$  – величина регулирующего воздействия;  $\lambda$  – коэффициент усиления нелинейности в процессе управления.

Использование  $n$ -мерной линейной комбинации функций  $F(\varepsilon)$  с различными значениями  $M$ ,  $a$  и  $\lambda$  даёт возможность аппроксимировать сложные нелинейные зависимости, используемые в качестве функций управления (законов регулирования).

Нечеткие регуляторы с фиксированной базой правил известны как статические нечеткие регуляторы и были разработаны в 1970-е годы как результат внедрения фундаментальных работ Л. Заде в задачи автоматического управления [3,4]. Однако эффективность применения фиксированной базы правил снижается на различных режимах, характерных, например, для систем программного управления и стабилизации, когда в переходном режиме имеют место значительные отклонения выходной переменной объекта управления от требуемого значения и требуется высокая точность стабилизации переменной на заданном уровне в установившемся режиме. В таких системах требуется перестраиваемое управление, для синтеза которого предлагается использовать несколько параллельно включенных нечетких корректирующих устройств (фаззи-регуляторов).

На рис. 1 приведена структурная схема системы с двумя фаззи-корректорами и логическими блоками, обеспечивающими выбор и переключение баз правил (БП) с разными видами терм.

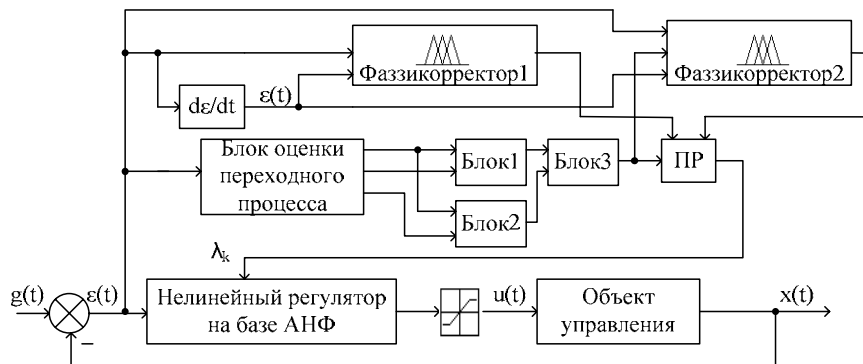


Рис. 1. Структурная схема адаптивной системы управления с двумя фаззи-корректорами

Каждый фаззи-корректор имеет два входа и один выход. Входными переменными являются отклонение  $\varepsilon(t)$  выходного сигнала  $x(t)$  от заданного значения  $g(t)$  и производная ( $d\varepsilon/dt$ ) этого отклонения, терм-множество которых является следующим: {«малое» (М), «норма» (Н) и «большое» (В)}. Для выходного сигнала первого фаззи-корректора 1 примем следующие выражения: «уменьшить» (М), «оставить в норме» (Н) и «увеличить» (В). Для выходного сигнала второго фаззи-корректора 2 примем следующие выражения: «сильно уменьшить (СМ)», «уменьшить» (М), «оставить в норме» (Н), «увеличить» (В) и «сильно увеличить» (СВ). Оперируя входными и выходными переменными и учитывая, что чем больше отклонение  $x(t)$  от заданного значения, тем больше должно быть корректирующее воздействие на коэффициент  $\lambda$  передачи (усиления) АНФ-регулятора, составляем базу правил (табл. 1,2).

Таблица 1

**Совокупность правил представления для трех терм**

Отклонение регулируемой переменной ( $\varepsilon$ )	Скорость изменения регулируемой переменной ( $d\varepsilon / dt$ )		
	М	Н	В
М	М	М	Н
Н	М	Н	В
В	Н	В	В

Таблица 2

## Совокупность правил представления пятью термами

Отклонение регулируемой переменной ( $\varepsilon$ )	Скорость изменения регулируемой переменной ( $d\varepsilon/dt$ )		
	М	Н	В
М	СМ	М	Н
Н	М	Н	В
В	Н	В	СВ

При синтезе системы использованы фаззификация треугольными функциями принадлежности как наиболее простыми и алгоритм логического вывода по Мамдани [5] как наиболее простой и позволяющий выносить суждение о том или ином параметре в виде утверждений, в отличие от их представления линейными функциями, характерного для нечеткого вывода Сугено. Для перехода от нечетких выводов к точному значению корректируемого параметра АНФ-регулятора используем формулу дефаззификации по методу центра тяжести.

Известно, что если объект управления и структура регулятора являются статическими звеньями, то при конечных значениях коэффициентов в замкнутой САУ будет возникать статическая ошибка. Для сведения ее к нулю и придания системе свойства астатизма требуется введение новых правил в базу знаний нечеткого регулятора. Однако слабым звеном нечетких систем, построенных даже на базе традиционного ПИД-регулятора, является этап фаззификации его настроечных параметров, и, в частности, такого ключевого параметра для обеспечения астатических свойств системы как времени интегрирования  $T_{и}$  регулятора, так как термы «уменьшить  $T_{и}$ » или «существенно увеличить  $T_{и}$ » и т.п. не всегда могут соответствовать оптимальным значениям настроек регулятора, обеспечивающих хотя и устойчивый, но и одновременно не качественный переходный процесс. При этом до сих пор не установлено, какое количество решающих правил необходимо для достижения астатических свойств системы. В большинстве случаев количество правил экспоненциально возрастает с повышением точности [6]. Такой неограниченный рост приводит к существенному возрастанию вычислительной сложности нечеткой модели и, в конечном итоге, к практической нереализуемости.

Исходя из вышесказанного, в данной работе предлагается ввести в алгоритм управления нечеткой системы непрерывный интегратор. Для обеспечения требуемых показателей качества наряду с астатическими свойствами при наличии переходных и установившихся режимов в системе установлена целесообразность изменения коэффициента интегрирования с помощью следующего нелинейного закона:

$$K_{и}=1/T_{и} = \begin{cases} \alpha n_{пу} & \varepsilon(t) > \delta; \\ \beta n_{пу} & \varepsilon(t) < \delta, \end{cases}$$

где  $\alpha, \beta$  – коэффициенты настройки интегратора;  $\varepsilon(t)$  – сигнал рассогласования;  $\delta$  – заданное значение сигнала рассогласования ( $\delta = \text{const}$ ).

В работе были получены переходные процессы при различных значениях параметра  $\delta$  (рис. 2). Удовлетворительные настройки интегратора  $\alpha = 0,04 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\beta = 0,1 \text{ мин}^{-1}$  и значение  $\delta = 2 \text{ м.е.}$  (м.е. – машинные единицы) получены в ходе математического моделирования. Установлено, что при неизменном количестве решающих правил нечеткий регулятор с переменным коэффициентом интегрирования  $K_{и} = f(\varepsilon)$  позволяет улучшить показатели качества переходного процесса по сравнению с нечетким регулятором с постоянным значением  $K_{и} = 0,154 \text{ мин}^{-1}$ .

Опишем кратко работу системы. В системе задаются пороговые максимальный верхний  $E_1$  и нижний  $E_2$  уровни отклонения ( $\varepsilon$ ) выходной переменной от зада-

ния, а также задается максимально допустимое время устранения отклонения ( $T \approx (3...5)T_p$ , где  $T_p$  – длительность переходного процесса).

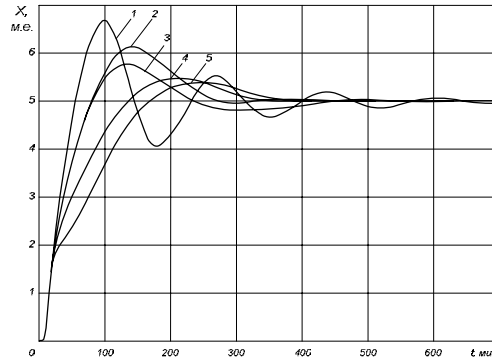


Рис. 2. Графики переходных процессов в нечеткой САУ при изменении уставки  $\delta$ :  
 1–  $\delta = 0$ , 2–  $\delta = 1$  м.е., 3–  $\delta = 2$  м.е., 4–  $\delta = 4$  м.е., 5–  $\delta = 5$  м.е.

С учетом этого в блоке 1 вычисляются величины  $S_1 = \max(|\epsilon - E_1|)$  и  $S_2 = \max(|E_2 - \epsilon|)$ , на основании которых оценивается необходимость подключения фаззи-корректора с той или иной базой правил. При этом, чем продолжительнее отклонение от порогового значения, тем большим должно быть корректирующее воздействие АНФ-регулятора. С учетом изложенного условия переключения реализованы в следующем виде:

$$\begin{aligned} &\text{если } (|\epsilon - E_1|) > 0 \text{ и } T \geq 3T_p \text{ и БП=БП2 и } \lambda_k = f_1(\epsilon, d\epsilon/dt), \\ &\quad \text{то выбрать БП=БП1, иначе БП=БП2;} \\ &\text{если } (|E_2 - \epsilon|) < 0 \text{ и } T \geq 3T_p \text{ и БП=БП1 и } \lambda_k = f_2(\epsilon, d\epsilon/dt), \\ &\quad \text{то выбрать БП=БП2, иначе БП=БП1.} \end{aligned} \tag{1}$$

Пусть в установившемся режиме на вход переключающего реле ПР поступает корректирующее воздействие  $\lambda_k$  с выхода фаззи-корректора 1. При превышении ошибкой регулирования первого порогового значения  $E_1$  начинается отсчет времени блоком 2 и вычисление величин  $S_1$  и  $S_2$ . В логическом блоке 3 проверяются условия переключения (1). При выполнении условий (1) блок 3 формирует командный сигнал на управляющий вход ПР, на второй вход которого подключен выход фаззи-корректора 2. В этом случае ПР осуществляет подключение выхода фаззи-корректора 2 на вход АНФ-регулятора, изменяя настроечный параметр  $\lambda_k$  в соответствии с новой базой правил. По истечении времени  $T$ , равного  $3T_p$ , величины  $S_1$  и  $S_2$  обнуляются и цикл повторяется заново.

Модель нечеткого регулятора составлена средствами пакета «Fuzzy Logic Toolbox». Нечеткие понятия, взятые выше в кавычки, представлены в модели терминами лингвистических переменных, с которыми сопоставлены треугольные функции принадлежности. Исследование переходных процессов проведено при подаче на вход системы скачкообразного изменяющегося сигнала задания на трех временных участках. В результате установлено, что подбором условий переключения базы правил, определяющей веса корректирующих воздействий в зависимости от значений  $\epsilon(t)$  и  $d\epsilon(t)/dt$ , можно получить монотонные переходные процессы и процессы без существенного перерегулирования с приемлемым временем регулирования. Такой характер переходных процессов объясняет несколько большее время переходных процессов по сравнению с системой управления с одной БП. В табл. 3,4 приведены оценки показателей качества переходного процесса (максимальное динамическое отклонение  $A_{max}$ , величина перерегулирования  $\sigma$ , степень затухания  $\psi$ ,

длительность переходного процесса  $T_{\text{пн}}$ ). Начальные значения параметров настройки ПИД-регулятора были рассчитаны с использованием критерия максимальной степени устойчивости. Для формирования базы правил ПИД-регулятора использован способ, предложенный в [7].

Анализ полученных результатов показывает, что качественные характеристики переходного процесса в системе с нечетким АНФ-регулятором с двумя базами правил лучше, чем с нечетким АНФ-регулятором с одной базой правил и нечетким ПИД-регулятором. Следует также отметить, что у нечеткого АНФ-регулятора корректируется лишь всего один настроечный параметр, тогда как у ПИД-регулятора их три.

Таблица 3

**Оценки показателей качества переходного процесса в системе с нечетким АНФ-регулятором с двумя базами правил для объекта с моделью**

$$W(p) = K_{об} \exp(-\tau p) / (T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)$$

Значения параметров модели объекта управления					Показатели качества переходного процесса в системе									
№	K <sub>об</sub> , ед. вых/ед.вх.	τ, мин	T <sub>1</sub> , мин	T <sub>2</sub> <sup>2</sup> , мин <sup>2</sup>	нечеткий АНФ-регулятор с двумя БП					нечеткий АНФ-регулятор с одной БП				
					структура БП	A, ед	σ, %	ψ, ед	T <sub>пн</sub> , мин	A, ед	σ, %	ψ, ед	T <sub>пн</sub> , мин	
1	0,1411	4,0	25,50	233,48	2-1-1	0**	0	0	0	400	0,24	4,8	1,0	200
2	0,2298	4,1	27,96	281,57	2-1-1	0	0	0	0	300	0,64	12,8	0,44	425
3	0,0766	6,0	41,56	73,10	2-1-1	0	0	0	0	400	0,25	5,0	1,0	400
4	0,3830	6,0	41,56	73,10	1-2-2	1,0	12,5	1,0*	0	250	1,55	31,0	0,77	550
5	0,0766	6,0	14,35	625,50	2-1-1	0	0	0	0	400	0	0	0	400
6	0,3830	6,0	14,35	625,50	1-2-2	2,2	27,5	0,86	0	600	0,09	1,8	1,0	62,8
7	0,0766	6,0	41,56	625,50	2-1-1	0	0	0	0	600	0,27	5,4	1,0	325
8	0,3830	6,0	41,56	625,50	2-1-1	1,1	22,0	1,0	0	250	1,55	31,0	0,77	500

Примечание: \* степень затухания  $\psi = 1$  соответствует аperiodическому переходному процессу;

\*\* нули в строке соответствуют монотонному переходному процессу (без перерегулирования);

аналогично для табл.4.

Последовательность цифр 2-1-1, 1-2-2 и т.д. соответствует реализации первой, второй и первой или первой, второй и второй базы правил и т.д.

Совокупность всех правил для нечеткой переменной с функцией принадлежности с тремя термами обозначена базой правил БП1, а совокупность всех правил для нечеткой переменной с функцией принадлежности с пятью термами обозначена базой правил БП2.

Таблица 4

**Оценки показателей качества переходного процесса в системе с нечеткими регуляторами для объекта с моделью  $W(p) = K_{об} \exp(-\tau p) / (T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)$**

Значения параметров модели объекта управления					Максимальная степень устойчивости J	Показатели качества тип регулятора							
№	K <sub>об</sub> , ед. вых/ед.вх.	τ, мин	T <sub>1</sub> , мин	T <sub>2</sub> <sup>2</sup> , мин <sup>2</sup>		нечеткий АНФ-регулятор				нечеткий ПИД-регулятор			
						A, ед	σ, %	ψ, ед	T <sub>пн</sub> , мин	A, ед	σ, %	ψ, ед	T <sub>пн</sub> , мин
1	0,1411	4,0	25,50	233,48	-0,141	0,24	4,8	1,0*	200	0,48	9,6	1,0	250
2	0,2298	4,1	27,96	281,57	-0,135	0,64	12,8	0,44	425	1,55	31,2	0,88	300
3	0,0766	6,0	41,56	73,10	-0,171	0,25	5,0	1,0	400	0,31	26,2	1,0	350
4	0,3830	6,0	41,56	73,10	-0,171	1,55	31,0	0,77	550	2,0	20,0	0,83	375
5	0,0766	6,0	14,35	625,50	-0,079	0**	0	0	400	0,41	8,2	0,51	700
6	0,3830	6,0	14,35	625,50	-0,079	0,09	1,8	1,0	62,8	1,9	38,0	0,74	574
7	0,0766	6,0	41,56	625,50	-0,092	0,27	5,4	1,0	325	0,4	8,0	1,0	300
8	0,3830	6,0	41,56	625,50	-0,092	1,55	31,0	0,77	500	4,23	84,6	0,21	700

Для обеспечения необходимой точности и астатических свойств системы достаточно скорректировать настройку интегратора, а структуру нечеткого регулятора оставить без изменений, ограничив базу правил минимальным количеством термов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лубенцов В.Ф. Исследование динамики систем с непрерывными аппроксимирующими функциями управления // Наука и технологии: Труды XXV Российской школы по проблемам науки и технологий. Ч.2. – М.: РАН, 2005. – С. 469-476.
2. Лубенцов В.Ф., Масютина Г.В. Коррекция регуляторов нелинейных систем с использованием нечеткой логики / Системный синтез и прикладная синергетика // Международная научная конференция 29.09-02.10.2009 г. Пятигорск. Сб. докладов. – Пятигорск: РИА на КМВ, 2009. – С. 220-223.
3. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
4. Zadeh L. The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems // Fuzzy Sets a Systems. – 1983. – Vol. 11, № 3. – P. 553-557.
5. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 736 с.
6. Кукса П.П. Обеспечение точности в нечетких системах [Электронный ресурс]. URL: <http://paul.rutgers.edu/~phuksa/publications/fz-accuracy-1u-04.pdf>.
7. Денисенко В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 1. – С. 78-88.

**Масютина Галина Владимировна**

Невинномысский технологический институт ГОУ ВПО «Северо-Кавказский государственный технический университет».

E-mail: lubenchov@nti.ncstu.ru.

357108, г. Невинномысск, ул. Гагарина, 1.

Тел.: 88655471343; 8865570401.

**Лубенцов Валерий Федорович****Masyutina Galina Vladimirovna**

Nevinnomyssk institute of technology "North Caucasian state technical university".

E-mail: lubenchov@nti.ncstu.ru.

1, Gagarina street, Nevinnomyssk, 357108, Russia.

**Lubenzov Valery Fedorovich**

УДК 681.51

**А.А. Колесников**

**СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
ОРБИТАЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ  
АППАРАТОВ**

*Решена задача управления полетом космического летательного аппарата с малой тягой с использованием системного закона гравитационного взаимодействия. Приведены процедура синтеза и результаты моделирования.*

*Моделирование; космический аппарат; нелинейная динамика; нелинейные системы; нелинейное управление.*