

СТАТЬИ

УДК 004:681.5

**МЕТОДИКА НАСТРОЙКИ НЕЧЁТКОГО РЕГУЛЯТОРА С НЕЛИНЕЙНОЙ
ХАРАКТЕРИСТИКОЙ Р-ТИПА СРЕДСТВАМИ MATLAB**

Богачёв И.С., Коломыцев В.Г.

*ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: mars_2009pl@mail.ru*

Проведён анализ тенденций развития современной теории и техники автоматического управления техническими объектами. Описана передаточная функция объекта управления. Приведено обоснование методики синтеза алгоритмов нечёткого управления в соответствии с требуемыми критериями функционирования автоматических систем. Показано, что для стабилизации работы систем нечёткие Р-регуляторы должны формировать нелинейный закон управления объектом. Разработаны пять аксиоматических требований к поверхности отклика нечёткого статического регулятора. Разработан алгоритм синтеза нечётких регуляторов Р-типа при реализации средствами Matlab. Приведены экспертные решения исходного состояния нечёткого регулятора. Сформированы лингвистические переменные входного воздействия. Построены модели системы с классическим ПИД-регулятором и нечётким регулятором Р-типа в среде Simulink. Приведены результаты четырёх экспериментов, в которых целенаправленное изменение параметров функций принадлежности входной лингвистической переменной и изменение базы правил позволило получить заданные показатели качества работы автоматической системы. Эксперименты проводились с использованием интеллектуально-градиентного модельно-экспериментального метода. В результате моделирования получены статическая характеристика, переходная характеристика и показатели качества. Результаты работы представлены в виде графиков исследуемых характеристик, сформированных на основе расчетов средствами Matlab.

Ключевые слова: системы автоматического управления, нечёткие регуляторы, ПИД-регуляторы, лингвистические переменные, термины лингвистических переменных

**TECHNIQUE FOR ADJUSTING A FUZZY REGULATOR
WITH A NONLINEAR P-TYPE CHARACTERISTIC BY MATLAB**

Bogachev I.S., Kolomytsev V.G.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: mars_2009pl@mail.ru

In this article, the analysis of trends in the development of modern theory and technology of automatic control of technical objects is carried out. The authors described the transfer function of the control object. The substantiation of the methodology for the synthesis of fuzzy control algorithms is given in accordance with the required criteria for the functioning of automatic systems. It is shown that in order to stabilize the operation of systems, fuzzy P – controllers must form a nonlinear law of object control. Five axiomatic requirements for the response surface of a fuzzy static controller have been developed. The algorithm for the synthesis of fuzzy P-type controllers when implemented was developed using Matlab. Expert solutions of the initial state of the fuzzy controller are given. The linguistic variables of the input action are generated. Models of a system with a classical PID – controller and a fuzzy P – type controller are built in the Simulink environment. The results of four experiments are given in which a purposeful change in the parameters of the accessory functions of the input linguistic variable and a change in the rule base made it possible to obtain the specified performance indicators of the automatic system. The experiments were carried out using an intelligent gradient model-experimental method. Static characteristic, transient response and quality indicators are obtained as a result of simulation. The results of the work are presented in the form of graphs of the studied characteristics, formed on the basis of calculations using Matlab.

Keywords: automatic control systems, fuzzy controllers, PID – controllers, linguistic variables, terms of linguistic variables

Анализ тенденций развития современной теории и техники автоматического управления техническими объектами позволяет определить перспективные направления научных исследований. Развитие теории и практики формирования нечётких логических алгоритмов управления, основанных на использовании знаний, опыта, логики, интуиции и эвристики исследования, является актуальным для решения многих прикладных задач автоматического управления техническими объектами.

При недостаточной информации об объекте, изменении случайным образом параметров объекта, при управлении нелинейными или сложными объектами, при

управлении объектами, обладающими свойствами уникальности, традиционные ПИД-регуляторы (hard – computing) не позволяют добиться высокого качества управления. В последнее десятилетие наметилась тенденция замены классических линейных регуляторов нечёткими регуляторами [1, 2].

Аппарат теории нечётких множеств предложил Л. Заде в 1965 г., а применение этой теории для построения систем с нечёткими регуляторами показал в 1974 г. Мамдани. Преимуществами нечётких регуляторов (soft – computing) являются: обеспечение требуемого качества управления объектами при внешних и внутренних возмущениях путём изменения передаточного ко-

эфициента регулятора на разных этапах переходного процесса, простая реализация программными методами, возможность минимизации среднеквадратического отклонения (СКО) при стабилизации стационарного режима работы системы, возможность изменять параметры нечёткого регулятора без изменения программы в целом. Основной недостаток нечётких контроллеров – сложность настройки (нормализация, фазсификация, составление базы нечётких правил, нечёткий вывод, дефазсификация, денормализация). Целостных и законченных методик синтеза алгоритмов нечёткого вывода на базе продукционных правил, позволяющих реализовать нечёткое управление в соответствии с требуемыми критериями функционирования автоматических систем, к настоящему времени не существует.

Материалы и методы исследования

Покажем методику настройки нечёткого регулятора с нелинейной характеристикой Р-типа средствами Matlab [3] на следующем примере.

Пусть передаточная функция объекта управления имеет вид

$$W_o(p) = \frac{k_o}{p(T_{01}p + 1)(T_{02}p + 1)},$$

где $k_o = 2$, $T_{01} = 0,2$ с, $T_{02} = 1$ с. Управление объектом осуществляется на основе фундаментального принципа по отклонению контролируемой функции от входного воздействия (принцип Ползунова – Уатта). Система при единичной отрицательной обратной связи и передаточном коэффициенте регулятора $k_{\text{пер}} = 3$ находится на границе устойчивости. Если применить традиционный ПИД-регулятор с передаточными коэффициентами, рассчитанными по методу Зиглера – Никольса (с дополнительной поднастройкой), [4] $k_p = 0,6$, $k_i = 0,714286$, $k_d = 0,35$, то система работает устойчиво с показателями качества $t_p = 10,7$ с, $\sigma = 52,5\%$, $\delta_{\text{стат}} = 0$.

В нечётких контроллерах воплощено желаемое состояние объекта управления и требуемое качество работы системы. В приведенной схеме нечёткий регулятор используется для непосредственного (прямого) управления объектом. Нечёткий логический вывод (блок формирования логических решений – inference) основан на использовании нечётких входных переменных (лингвистических переменных) и нечётких правилах преобразований $\tilde{\epsilon}$ в \tilde{y} .

Для стабилизации работы системы с требуемыми показателями качества нечёт-

кий Р-регулятор должен формировать нелинейный закон управления [5, 6].

Введём аксиоматические требования к поверхности отклика нечёткого статического регулятора:

1. Выполнить формирование поверхности отклика регулятора, обеспечивающей плавность процесса управления.

2. Для стабилизации работы системы в районе нуля входной переменной ϵ статический передаточный коэффициент регулятора выполнить меньше единицы.

3. С целью уменьшения времени переходного процесса в районах, где входная переменная $|\epsilon| \approx 1$, статический передаточный коэффициент регулятора установить больше единицы.

4. Нелинейный закон управления объектом должен содержать пять участков, что предопределяет минимальное количество термов (семь), ибо типовой переходный процесс содержит три участка (разгон, торможение, стабилизация) при положительных и отрицательных значениях расогласования, а нечёткое описание позволяет сгладить переходы от одного участка к другому.

5. Стратегия управления объектом: при запуске системы коэффициент усиления регулятора повышается, уменьшая время переходного процесса, при приближении выходной функции к требуемому значению передаточный коэффициент резко снижается, уменьшая перерегулирование и стабилизируя работу системы.

Алгоритм синтеза нечёткого нелинейного регулятора Р-типа следующий:

1. В линейном нечётком регуляторе Р-типа формируем лингвистические переменные $\tilde{\epsilon}$ и \tilde{y} с семью термами с базовыми настройками в Matlab и семью продукционными правилами «вход – выход» (знак управления совпадает со знаком ошибки).

2. Линейный нечёткий Р-регулятор преобразуем в нелинейный путём смещения центров и координат оснований функций принадлежности входной лингвистической переменной с целью уменьшения времени переходного процесса и установки в координату ноль универсального множества центра функции принадлежности $tf4$ с параметрами основания, охватывающего универсальное множество $[-1,1]$ для стабилизации работы системы.

3. Устанавливаем тип нечёткой системы – Мамдани.

4. Формируем базу правил и изменяем параметры функций принадлежности так, чтобы статическая характеристика нечёткого регулятора соответствовала аксиоматическим правилам и переходный

процесс формировался быстро затухающим устойчивым.

5. Проверка работоспособности системы и настройка регулятора производятся на модели системы в графическом редакторе Simulink, встроенном в информационную систему Matlab.

6. Если по каналам управления и возмущения наблюдаются недопустимые статические ошибки, то на выходе нечёткого регулятора устанавливается ПИ-регулятор.

Конкретизируем методику синтеза (механизм выбора) нечёткого нелинейного Р-регулятора управления объектом, используя возможности развивающейся информационной среды Matlab.

Стратегия управления отображается в формируемых лингвистических переменных и базе правил. Вырабатывается тактика управления по графикам переходных характеристик и статическим характеристикам регулятора. Графики разбиваются на зоны (участки). Проводится анализ лингвистических переменных и продукционных правил на каждом участке и вырабатывается требуемое управляющее воздействие. Графики характеристик «выход – вход» нечёткого регулятора выводятся в браузере SurfaceViewer.

Сформируем лингвистические переменные входного воздействия $\tilde{\epsilon}$ и выходной функции \tilde{y} . Примем количество

термов лингвистических переменных равным 7. Форма функций принадлежности выбирается, исходя из смысла решаемой задачи. В [1, 3] показано, что в системах автоматического управления с нечёткими регуляторами предпочтительно использовать треугольные функции принадлежности [7]. Используем тип функции принадлежности trimf (треугольный) на универсальном множестве $[-1,1]$. Названия термов, имя и базовые параметры функций принадлежности приведены в табл. 1.

Экспертный закон управления, составленный в виде связей между лингвистическими метками входного воздействия и термами регулирующего воздействия на начальном этапе синтеза нечёткого регулятора, приведен в табл. 2.

Построим в программной среде Simulink модели систем с ПИД-регулятором и с нечётким регулятором (рис. 1).

Настройку параметров функций принадлежности входной лингвистической переменной и формирование базы правил осуществим в следующей последовательности.

Эксперимент № 1

Параметры функций принадлежности входной и выходной лингвистических переменных (базовые в Matlab) приведены в табл. 1. База знаний формируется по данным табл. 2.

Таблица 1

Названия термов, имя и базовые параметры функций принадлежности

Названия функций принадлежности	Имя функции принадлежности	Базовые параметры в MATLAB
LN – large negative	mf1	[-1,333 -1 -0,6667]
MN – medium negative	mf2	[-1 -0,6667 -0,3333]
SN – small negative	mf3	[-0,6667 -0,3333 -5,55e-17]
Z – zero	mf4	[-0,333 0 0,333]
SP – small positive	mf5	[-5,55e-17 0,3333 0,6667]
MP – medium positive	mf6	[0,3333 0,6667 1]
LP – large positive	mf7	[0,6667 1 1,333]

Таблица 2

Экспертные решения исходного состояния нечёткого регулятора

$\tilde{\epsilon} \setminus \tilde{y}$	LP	MP	SP	Z	SN	MN	LN
LP	√						
MP		√					
SP			√				
Z				√			
SN					√		
MN						√	
LN							√

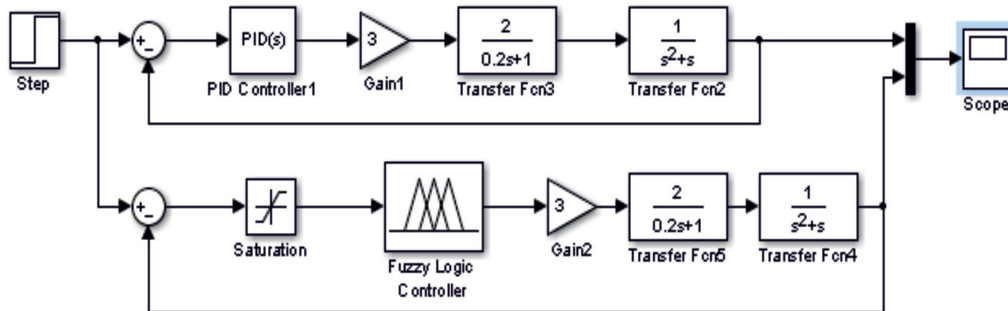


Рис. 1. Модели систем с ПИД-регулятором (верхняя часть рисунка) и с нечётким регулятором (нижняя часть рисунка)

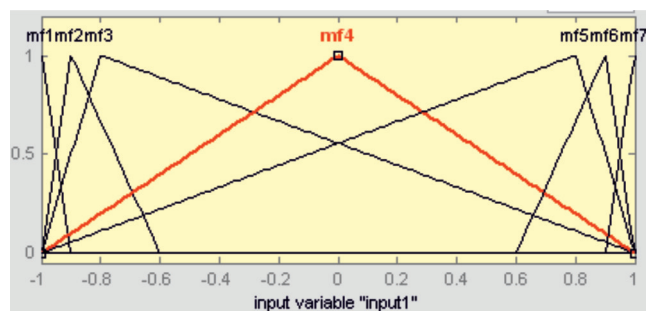


Рис. 2. Функции принадлежности входной лингвистической переменной $\tilde{\epsilon}$

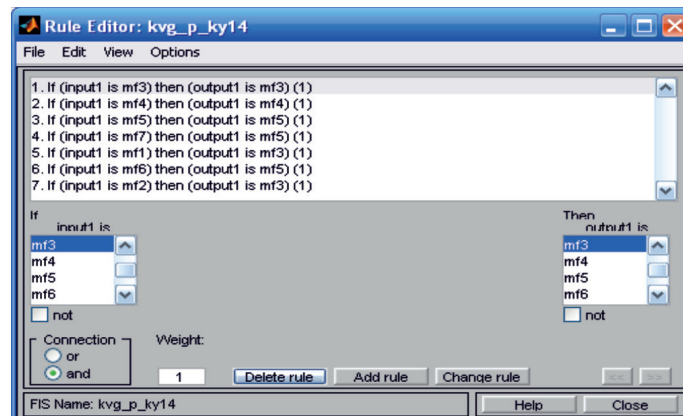


Рис. 3. База правил настроенного нечёткого нелинейного регулятора P-типа

Эксперимент № 2

Вводим следующие изменения координат оснований и вершин функций принадлежности входной лингвистической переменной: $[-1, 1 \ -1 \ -0,9] \in mf1$, $[-1 \ -0,9 \ -0,6] \in mf2$, $[-0,9 \ -0,6 \ 0] \in mf3$, $[-0,6 \ 0 \ 0,6] \in mf4$, $[0 \ 0,6 \ 0,9] \in mf5$, $[0,6 \ 0,9 \ 1] \in mf6$, $[0,9 \ 1 \ 1,1] \in mf7$.

Эксперимент № 3

Изменим параметры функций принадлежности: $[-1 \ -0,8 \ 1] \in mf3$, $[-1 \ 0 \ 1] \in mf4$, $[-10,8 \ 1] \in mf5$. Остальные функции принадлежности с теми же параметрами, что

и в предыдущем эксперименте. Введём изменения в базу правил: ЕСЛИ mf1, ТО mf2, ЕСЛИ mf7, ТО mf6.

Эксперимент № 4

Параметры функций принадлежности $\tilde{\epsilon}$ (рис. 2) оставляем теми же, что и в эксперименте № 3, но изменяем базу правил, приведенную на рис. 3.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате эксперимента № 1 получили, что статическая характеристика ре-

гулятора близка к линейной с передаточным коэффициентом близким к единице, переходная характеристика – периодические синусоидальные колебания (система на границе устойчивости). Эксперимент № 2 показал, что статическая характеристика регулятора на базовом множестве $[-0,5; 0,5]$ близка к линейной, передаточный коэффициент на этом участке меньше единицы, переходная характеристика – процесс устойчив, слабо затухающего характера. В ходе эксперимента № 3 выявили, что статическая характеристика регулятора на базовом множестве $[-0,6; 0,6]$ близка к линейной, передаточный коэффициент на этом участке стал меньше, чем в эксперименте № 2, в диапазонах $[-1; -0,4]$ и $[0,6; 1]$ базового множества статическая характеристика близка к линейной с большим передаточным коэффициентом, переходная характеристика – процесс устойчив, быстро затухающего характера с показателями ка-

чества $\sigma = 63,4\%$, $t_p = 7,37$ с, $N = 1$. На завершающем этапе эксперимент № 4 позволил привести статическую характеристику в требуемый вид – характеристика изображена на рис. 4, переходная характеристика приведена на рис. 5, показатели качества соответствуют требуемым значениям $\sigma = 37,2\%$, $t_p = 7,35$ с, $N = 1$.

Заключение

В ходе исследования выявили, что для стабилизации работы системы необходимо изменить настройки нечёткого регулятора. Введенные изменения в параметры функций принадлежности $\tilde{\epsilon}$ в эксперименте № 2 оказались эффективны, и возникла необходимость продолжать изменение параметров в этом направлении, добиваясь улучшения качества работы системы. После изменения параметров функций принадлежности $mf3$ и $mf4$ получили неприемлемую величину перерегулирования $\sigma = 63,4\%$.

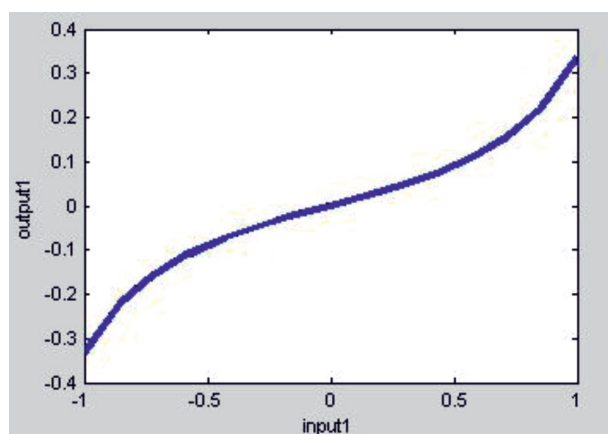


Рис. 4. Статическая характеристика нечёткого нелинейного регулятора Р-типа

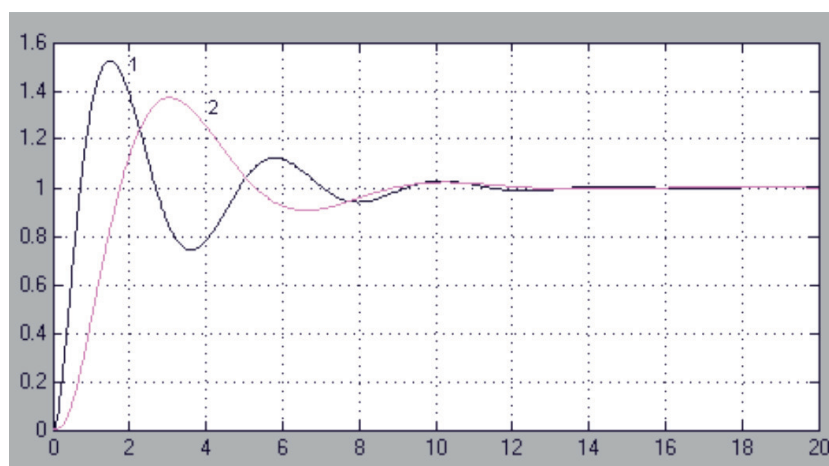


Рис. 5. Переходные характеристики системы с ПИД-регулятором (кривая 1) и с нечётким регулятором (кривая 2)

Для его снижения уменьшили передаточный коэффициент регулятора вне средней зоны базового множества и получили требуемые статическую характеристику нечёткого нелинейного регулятора Р-типа (рис. 4) и переходные характеристики системы с ПИД-регулятором и с нечётким регулятором (рис. 5).

Список литературы

1. Бураков М.В. Нечёткие регуляторы: учебное пособие для вузов. СПб.: ГУАП, 2010. 252 с.
2. Гостев В.И. Проектирование нечётких регуляторов для систем автоматического управления. СПб.: БХВ – Петербург, 2011. 416 с.
3. Коломыцев В.Г. Линейные автоматические системы: лабораторный практикум. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2020. 137 с.
4. Бураков М.В., Коновалов А.С. Синтез нечётких логических регуляторов // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1. С. 22–27.
5. Горюшкин В.А. Математические модели с логическими регуляторами // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2012. № 20. С. 5–14.
6. Бураков М.В., Кирпичников А.П. Нечеткий регулятор ПИД-типа для нелинейного объекта // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 4. С. 242–244.
7. Котляров Р.В., Пачкин С.Г. Моделирование нечеткой системы управления эмулятором печи овен // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 9. С. 26–31.