

## Исследование применения нечетких регуляторов в системах управления технологическими процессами

Куленко М.С., канд. техн. наук, Буренин С.В., ст. преп.

Рассмотрены вопросы использования регуляторов на основе нечеткой логики в системах автоматического управления различной конфигурации. Приведены результаты исследования систем с нечеткими регуляторами. Эффективность использования нечетких регуляторов показана на примере построения системы нечеткого регулирования натяжения транспортируемого гибкого материала.

*Ключевые слова:* нечеткая логика, термы, фаззификация, пропорционально-интегральный регулятор.

## Researching Application of Fuzzy Controllers in Technological Processes Control Systems

M.S. Kulenko, Candidate of Engineering, S.V. Burenin, Senior Teacher

The author considers questions of using the controllers based on fuzzy logic in automatic control systems of different configurations. The author presents the research results of fuzzy controllers systems. The efficiency of using fuzzy controllers is shown by the example of system integration of fuzzy regulation of pulling transported flexible material.

*Key words:* fuzzy logic, terms, fuzzification, proportional and floating controller.

Свойства нечеткой логики обрабатывать неполную информацию, моделировать человеческие знания и выдавать обоснованные решения предполагают ее интенсивное использование для наблюдения в реальном времени за технологическими процессами, а также решение проблем, связанных с практической реализацией систем управления технологическими процессами [1]. Использование нечеткой логики в системах управления позволяет уменьшить вмешательство оператора в процесс управления и, следовательно, позволяет разработать новые методики управления, более адаптированные к промышленной среде.

Регуляторы, построенные на базе нечеткой логики, в ряде случаев способны обеспечить более высокие показатели качества переходных процессов по сравнению с классическими регуляторами. Кроме того, используя методы синтеза нечетких алгоритмов управления, можно выполнить оптимизацию сложных контуров регулирования без проведения всесторонних математических исследований.

Исследуем поведение систем на основе элементарных динамических звеньев. Выберем в качестве простейшего объекта регулирования инерционное звено первого порядка. Так как объект не содержит интегрирующих звеньев, то можно провести оптимизацию модуля передаточной функции контура регулирования.

Рассмотрим применение пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора. Структурная схема модели объекта с одним инерционным звеном 1-го порядка с классическим и нечетким ПИ-регулятором, выполненная в про-

граммном комплексе *MatLab/Simulink*, представлена на рис. 1.

Нечеткая система выполнена по типу Мамдани [2] с двумя входами: для пропорциональной  $x_1$  и интегральной  $x_2$  составляющих. Для лингвистического описания каждой входной переменной выбраны семь треугольных термов (*NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB*) и симметричные диапазоны изменения.

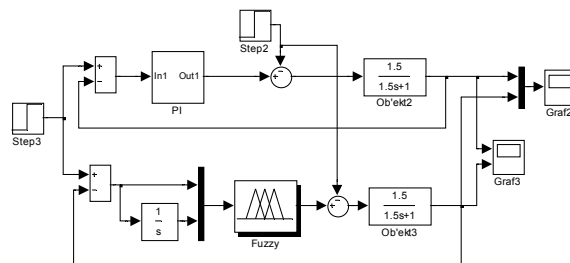


Рис. 1. Структурная схема объекта, представленного инерционным звеном 1-го порядка с ПИ-регулятором и с ПИ-подобным fuzzy-регулятором

Лингвистические правила для ПИ-подобного fuzzy-регулятора приведены в табл. 1.

Таблица 1

X2 \ X1	N	Z	P
N	NB	NM	ZE
Z	NM	ZE	PM
P	ZE	PM	PB

Правила формируются по типу *ЕСЛИ ... И ..., ТО....* Переходные процессы при ступенчатом изменении задания на входе и реакции на возмущающее воздействие на объект представлены на рис. 2.

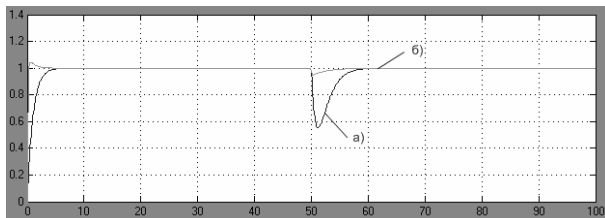


Рис. 2. Переходный процесс для системы с инерционным звеном 1-го порядка: а – с ПИ-регулятором; б – с ПИ-подобным fuzzy-регулятором

Исследуем применение пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора. Структурная схема модели объекта с одним инерционным звеном 1-го порядка с ПИД-подобным fuzzy-регулятором представлена на рис. 3. Здесь в структурную схему модели добавлена дифференциальная составляющая сигнала рассогласования.

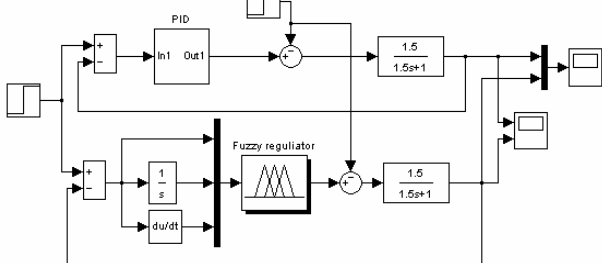


Рис. 3. Структурная схема объекта, представленного одним инерционным звеном 1-го порядка с ПИД-регулятором и ПИД-подобным fuzzy-регулятором

Список логико-лингвистических правил дополнен следующими тремя правилами:

- 1) IF ( $x_3=N$ ) THEN ( $y=N$ );
- 2) IF ( $x_3=ZE$ ) THEN ( $y=ZE$ );
- 3) IF ( $x_3=P$ ) THEN ( $y=P$ ).

Действительно, если скорость изменения ошибки положительна, то выходной сигнал регулятора должен увеличиться, чтобы предупредить увеличение сигнала рассогласования, и наоборот. Более точная настройка диапазона изменения Д-составляющей осуществляется методом подбора значений.

Переходные процессы для модели с аналоговым ПИД-регулятором и ПИД-подобным fuzzy-регулятором представлены на рис. 4.

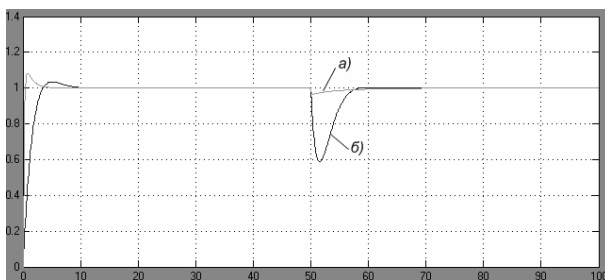


Рис. 4. Переходный процесс для системы, представленной одним инерционным звеном 1-го порядка: а – с ПИД-регулятором; б – с ПИД-подобным fuzzy-регулятором

Наличие Д-составляющей уменьшило динамическую ошибку системы, однако время регулирования в случае использования ПИД-подобного fuzzy-регулятора увеличилось.

Предположим теперь, что объект регулирования содержит два инерционных звена первого порядка с одинаковыми постоянными времени. Исследуем применение ПИ-регулятора.

Лингвистические правила в этом случае приведены в табл. 2.

Таблица 2

X1 \ X2	N	Z	P
N	NB	PM	NB
Z	NM	ZE	PM
P	ZE	PM	PB

Переходные процессы для модели с аналоговым регулятором и модели с fuzzy-регулятором при ступенчатом изменении задания на входе и отработке единичного возмущающего воздействия на объект представлены на рис. 5.

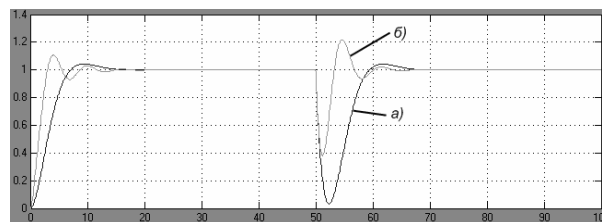


Рис. 5. Переходный процесс для системы, представленной двумя инерционными звеньями 1-го порядка: а – с ПИ-регулятором; б – с ПИ-подобным fuzzy-регулятором

В случае применения ПИД-подобного fuzzy-регулятора для объекта с двумя инерционными звеньями 1-го порядка получим графики переходных процессов, представленные на рис. 6.

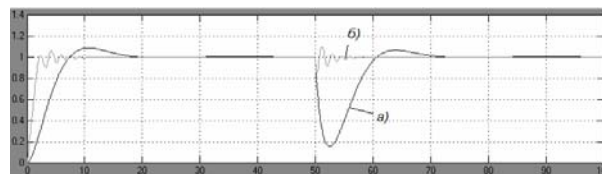


Рис. 6. Переходный процесс для системы, представленной двумя инерционными звеньями 1-го порядка: а – с ПИД-регулятором; б – с ПИД-подобным fuzzy-регулятором

Очевидно, время регулирования и число колебаний больше для системы с fuzzy-регулятором, однако динамическая ошибка значительно уменьшилась.

Предположим, что объект регулирования содержит не только инерционное звено первого порядка, но и интегрирующее звено. Оптимизацию контура регулирования с объектом, содержащим интегрирующее звено, осуществим по симметричному оптимуму.

Создадим нечеткую систему, реализующую типовой аналоговый ПИ-регулятор.

Лингвистические правила для такого ПИ-подобного fuzzy-регулятора приведены в табл. 3.

Таблица 3

		X1		
		N	Z	P
X2	N	NB	PM	NB
	Z	NM	ZE	PM
	P	ZE	PM	PB

Переходные процессы для модели с аналоговым ПИ-регулятором и модели с ПИ-подобным fuzzy-регулятором представлены на рис. 7.

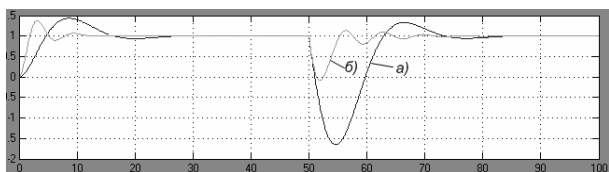


Рис. 7. Переходный процесс для системы, представленной одним инерционным звеном 1-го порядка и интегрирующим звеном: а – с ПИ-регулятором; б – с ПИ-подобным fuzzy-регулятором

Очевидно, колебательность несколько выше в системе с fuzzy-регулятором, однако динамическая ошибка значительно меньше.

Результаты реализации ПИД-подобного fuzzy-регулятора представлены на рис. 8.

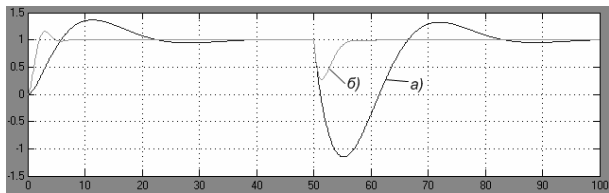


Рис. 8. Переходный процесс для системы, представленной одним инерционным звеном 1-го порядка и интегрирующим звеном: а – с ПИД-регулятором; б – с ПИД-подобным fuzzy-регулятором

По аналогичному алгоритму выполнен анализ использования нечетких регуляторов для объектов, описываемых комбинацией элементарных звеньев: интегральных и апериодических с большими и малыми постоянными времени.

В качестве примера реализации нечеткого регулятора рассмотрим использование fuzzy-регулятора в системах управления натяжением гибкого транспортируемого материала.

В большинстве случаев при проектировании систем управления натяжением [3] требуется модель, отражающая лишь наиболее общие характеристики системы и отличающаяся достаточной для анализа точностью при ее максимальной простоте. В практике проектирования автоматических систем регулирования натяжения, построенных на базе петлеобразователей, традиционно используются ско-

ростная и метрическая [4] модели зоны деформации. В основу их положено известное дифференциальное уравнение деформации материала в петлеобразователе:

$$L \frac{1 + \varepsilon_0}{1 + \varepsilon_1} \frac{d\varepsilon_1}{dt} = v_{p2} - v_{p1} + v_{p2}\varepsilon_0 - v_{p1}\varepsilon_1 \pm k_f v_k,$$

где  $L$  – длина материала в зоне деформации;  $\varepsilon_1, \varepsilon_0$  – относительное удлинение в зоне деформации и на ее входе соответственно;  $v_{p1}, v_{p2}$  – линейные скорости материала на входе и выходе зоны;  $v_k$  – линейная скорость перемещения измерительного ролика;  $k_f$  – коэффициент, учитывающий геометрию охвата измерительного ролика ветвями материала.

В скоростной модели относительное удлинение вычисляется непосредственно по скоростям  $v_{p1}$  и  $v_{p2}$ , в метрической – на основе длин нерастянутого материала на входе и выходе зоны деформации. Возьмем за основу скоростную модель петлеобразователя (рис. 9) как наиболее отвечающую цели управления с точки зрения формирования управляющего воздействия по каналу регулирования скорости ведомого двигателя.

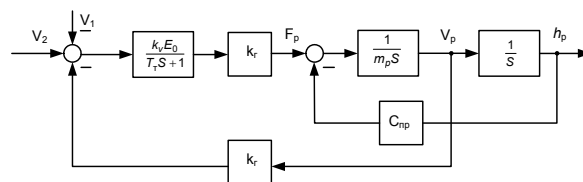


Рис. 9. Структурная схема петлеобразователя

Определение входных и выходных переменных системы, так же как и правил нечеткого регулятора, основано на практических знаниях о системе и на интуиции. Поскольку регулируемой величиной является положение измерительного ролика петлеобразователя, то целесообразно выбрать одной из входных переменных ошибку по положению ролика:

$$\Delta h = h_{зад} - h_p,$$

где  $h_p$  – текущее положение ролика;  $h_{зад}$  – заданное положение. Причем ошибка может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Регулирование положения ролика петлеобразователя происходит путем изменения рассогласования линейных скоростей движения материала в зоне за счет изменения скорости вращения электродвигателя ведомого канала, причем величина рассогласования зависит от положения ролика: чтобы уменьшить натяжение материала, рассогласование следует снизить, а с другой стороны, если натяжение находится на заданном уровне, рассогласование также должно соответствовать заданному значению.

Таким образом, выходной переменной регулятора имеет смысл назначить сигнал управления скоростью ведомого электропривода, который и определяет рассогласование линейных скоростей приводных точек, а еще

одной дополнительной входной величиной будем считать скорость перемещения измерительного ролика или, соответственно, скорость изменения ошибки регулирования положения, что эквивалентно использованию пропорционально-интегрального регулятора.

Структурная схема системы управления с fuzzy-регулятором положения ролика представлена на рис. 10.

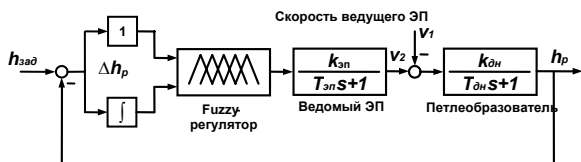


Рис. 10. Структурная схема системы управления с fuzzy-регулятором положения

Петлеобразователь представлен редуцированной передаточной функцией [4]:

$$H_n(S) = \frac{k_{Дн}}{T_{Дн}S + 1}.$$

Канал ведомого электропривода представляем, также пренебрегая старшими производными в оптимизированной структуре:

$$H_{Эп}(S) = \frac{k_{Эп}}{T_{Эп}S + 1}.$$

Рассмотрим систему с fuzzy-регулятором положения и систему, использующую аналоговый ПИ-регулятор при работе на объект, содержащий два апериодических звена с существенно различными постоянными времени.

При разработке fuzzy-регулятора количественное задание параметров регулятора на его входе преобразуем в коррекцию диапазона изменения его входных координат: диапазона изменения ошибки положения ролика x1\_pr (соответствующей пропорциональной составляющей регулятора) и диапазона возможных значений скорости изменения ошибки положения ролика x2\_int (соответствующей интегральной составляющей).

Формирование базы правил fuzzy-регулятора ведется на основе уравнения для линейного непрерывного ПИ-регулятора

$$y(t) = k_n \cdot \varepsilon(t) + \frac{1}{T_u} \cdot \int \varepsilon(t) dt,$$

которое можно заменить близким по логике управления fuzzy-регулятором, если в качестве его выходной переменной рассматривать приращение управляющего воздействия Δу. Тогда закон регулирования ПИ-регулятора можно представить в дифференциальной форме

$$\frac{dy(t)}{dt} = k_n \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \frac{1}{T_u} \varepsilon(t)$$

или в разностной форме

$$\Delta y(k) = y(k) - y(k - 1) = k_n \Delta \varepsilon(k) + \frac{\Delta t}{T_u} \varepsilon(k).$$

Таким образом, для входных переменных ε(k) и Δε(k) и выходной Δу(k) может быть синтезирован fuzzy-регулятор, реализующий нелинейный закон

$$\Delta y(k) = F[\Delta \varepsilon(k), \varepsilon(k)],$$

эквивалентный в определенном смысле аналоговому ПИ-регулятору.

Для нашего случая x1\_pr = Δh соответствует сигналу рассогласования ε(k), x2\_int = Δh/Δt соответствует приращению сигнала рассогласования Δε(k), а у соответствует Δh(k). Лингвистические правила для такого ПИ-подобного fuzzy-регулятора приведены в табл. 4.

Таблица 4

$\frac{\Delta h}{\Delta h/\Delta t}$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Структурная схема математической модели системы в комплексе MatLab представлена на рис. 11.

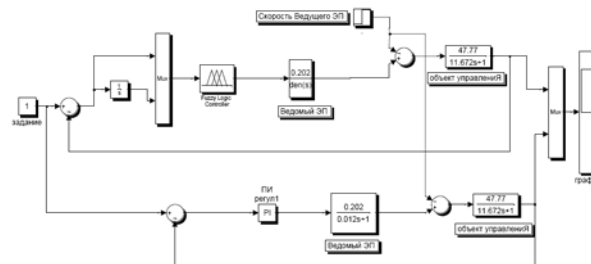


Рис. 11. Структурная схема математической модели системы управления натяжением с нечетким регулятором

На рис. 12 представлена реакция системы с fuzzy-регулятором и аналоговым ПИ-регулятором на единичное задание положения. В момент времени t = 6 с происходит отработка возмущающего воздействия в виде увеличения скорости ведущего электропривода.

Следует отметить, что перерегулирование для обоих типов регуляторов примерно одинаковы, а по быстродействию нечеткий регулятор более эффективен. При отработке возмущения по каналу скорости ведущего электропривода очевидна более быстрая и качественная реакция нечеткого регулятора.

На рис.13 представлена реакция системы с fuzzy-регулятором и аналоговым ПИ-регулятором на единичное задание положения при уменьшенном на 50 % коэффициенте усиления объекта регулирования.

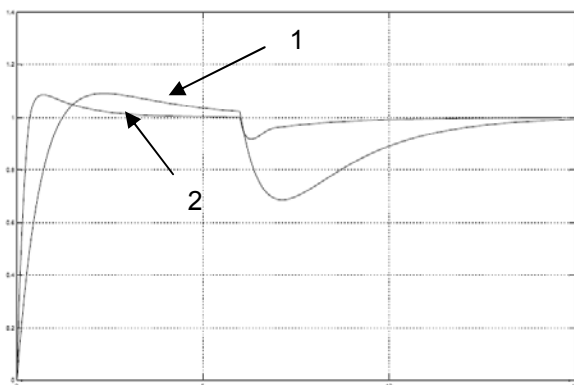


Рис. 12. Реакция системы на единичное задание положения и возмущение по каналу скорости ведущего двигателя: 1 – ПИ-регулятор; 2 – ПИ-подобный fuzzy-регулятор

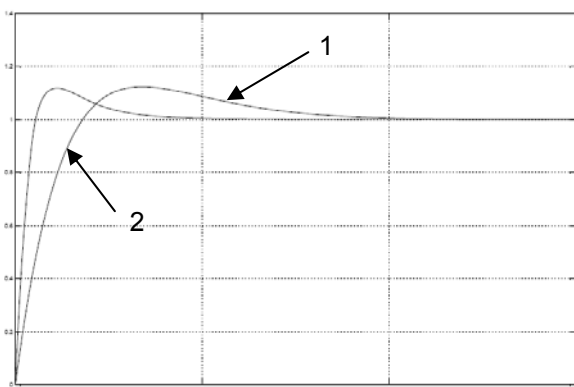


Рис. 13. Реакция системы на единичное задание положения при двукратной вариации коэффициента усиления объекта регулирования: 1 – ПИ-регулятор; 2 – ПИ-подобный fuzzy-регулятор

### Заключение

Куленко Михаил Сергеевич,  
Ивановский государственный энергетический университет,  
кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок,  
телефон 8-920-670-87-91,  
e-mail: coolenko@drive.ispu.ru

Буренин Сергей Владимирович,  
Ивановский институт ГПС МЧС России,  
старший преподаватель кафедры высшей математики и информатики,  
e-mail: burenin\_s@mail.ru

В результате проведенных исследований применения нечетких регуляторов при управлении объектами с различными динамическими свойствами получены рекомендации по формированию базы нечетких правил в зависимости от конфигурации систем с ПИ- и ПИД-подобными регуляторами для обеспечения характеристик, не уступающих характеристикам классических регуляторов.

Применение fuzzy-регулятора положения измерительного ролика датчика натяжения, эффективность использования которого показана на примере системы взаимосвязанного электропривода с нечетким регулятором натяжения для транспортирования гибкого длиннономерного материала, позволило стабилизировать регулируемую координату в широком диапазоне вариаций параметров объекта.

### Список литературы

1. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976.
2. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Trans. Systems Man Cybernet. – 1985. – Vol. 15. – No. 116. – P. 116–132.
3. Глазунов В.Ф., Тарарыкин С.В., Спичков Ю.П. О рациональном построении датчика натяжения ткани в поточных линиях текстильной промышленности // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1981. – № 1. – С. 78–82.
4. Глазунов В.Ф., Куленко М.С. Редуцирование математических моделей петлеобразователей в системе управления натяжением ткани // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2008. – № 6. – С.101–104.