

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ПРОГРЕССИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ПРИ НАСТРОЙКЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПИ-ТИПА

А.В. Копотева

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
филиал в г. Березники, г. Березники, Россия*

Введение. В статье рассматривается возможность использования геометрической прогрессии для подбора настроек нечетких логических регуляторов. Треугольные и трапециевидные функции принадлежности достаточно часто используются для описания параметров нечетких регуляторов, а настройка регулятора сводится к подбору оснований таких функций. Обзор публикационной активности по данной тематике показал, что не существует универсального метода настройки нечетких регуляторов, а те, что существуют, весьма сложны и недостаточно подробно описаны, чтобы их можно было легко повторить.

Цель исследования. Мы предположили, что основания функций принадлежности термов параметров нечетких регуляторов могут быть описаны некоторой числовой прогрессией, в частности, геометрической, что позволит свести процедуру настройки регулятора к подбору единственного параметра – знаменателя прогрессии.

Материалы и методы. В предположении, что первый член прогрессии равен единице, был выполнен расчет ее второго и третьего членов с различными знаменателями в интервале от 1,5 до 3,5 с шагом 0,2, которые были приняты за основания функций принадлежности термов условной лингвистической переменной. В FIS-редакторе MATLAB был спроектирован ПИ-подобный нечеткий регулятор с пятитермовыми параметрами. После этого на основании анализа результатов работы автоматически настроенного ПИ-регулятора для выбранного объекта управления были определены интервалы изменения входных и выходного параметров нечеткого ПИ-регулятора, на которые была спроецирована условная лингвистическая переменная. В результате были получены одиннадцать различных настроек, которые были использованы для управления технологическим объектом с запаздыванием.

Результаты. Семь из полученных нечетких регуляторов оказались вполне пригодными для управления выбранным объектом. Полученные на основании результирующих переходных процессов показатели качества регулирования были сопоставлены с соответствующими показателями качества управления обычного ПИ-регулятора. Было установлено, что все семь нечетких регуляторов обеспечивают гораздо лучшее качество управления по сравнению с обычным ПИ-регулятором.

Заключение. Полученные результаты позволяют утверждать, что применение геометрической прогрессии для определения параметров нечетких регуляторов является простым и эффективным способом получения их настроек удовлетворительного качества.

Ключевые слова: нечеткий логический регулятор, функция принадлежности, геометрическая прогрессия, объект управления с запаздыванием, ошибка регулирования, время регулирования, ПИ-регулятор

Введение

Управление сложными технологическими объектами на базе нечетких логических регуляторов является весьма распространенным современным направлением прикладных исследований. При этом не существует общепринятых методов их проектирования, а настройки подбираются экспериментально под каждый конкретный объект управления. Как правило, процесс настройки регулятора представляет собой сложную оптимизационную или итерационную процедуру. В частности, в [1] приводятся примеры настроенных нечетких систем для управления рядом

промышленных объектов, а также для решения задач распознавания образов и речи, однако о проектировании и настройке таких систем авторы умалчивают. Авторы [2] при обосновании преимуществ использования нечетких логических регуляторов для управления процессом стабилизации катализатора установки каталитического риформинга бензинов по сравнению с классическими ПИД-регуляторами рассматривают различные варианты функций принадлежности термов параметров регулятора, причем отсутствует как обоснование выбора диапазонов изменения параметров регулятора, так и ссылка на соответствующий источник. В [3] рассматривается гибридная система из обычного и нечеткого ПИД-регуляторов для управления электродвигателем постоянного тока, однако процедура подбора оснований функций принадлежности термов параметров нечеткой составляющей регулятора подробно не описана. В ряде работ для настройки параметров нечетких регуляторов разрабатываются достаточно сложные и трудоемкие алгоритмы различной природы. В частности, в [4] подбор параметров нечеткого регулятора для управления нестационарным процессом радиохимического производства осуществляется в рамках совокупности оптимизационной и итерационной процедур. Авторы [5] для настройки параметров нейро-нечеткого регулятора предлагают использовать генетический алгоритм. В [6] для подбора параметров нечеткого регулятора используется численный алгоритм оптимизации методом градиентного спуска. В [7] применяется метод настройки нечетких регуляторов на основании анализа результатов их работы, в [8] авторы рассматривают возможность самонастройки нейро-нечеткого регулятора, а в [9] – нечеткого ПИ-регулятора. В [10] подбор параметров нечеткого регулятора осуществляется на основании рекурсивного алгоритма Калмана, в [11] – на основании оптимизационного алгоритма «серых волков», в [12] – «роя частиц» (формы роевого интеллекта). В [13] авторы разрабатывают и применяют гибридный детерминировано-стохастический алгоритм для оптимизации параметров функций принадлежности термов.

В большинстве работ в качестве функций принадлежности термов параметра выбирается совокупность из центральных треугольных и боковых трапециевидных их видов. При этом исходные основания функций принадлежности термов нечетких переменных обычно выбираются равными, что предполагает постоянную точность регулирования на всем множестве значений входных параметров нечеткого регулятора; корректировка этих оснований и происходит в процессе настройки регулятора.

Недостатком всех рассмотренных работ помимо сложности настройки нечеткого регулятора является отсутствие результатов работы алгоритмов настройки в форме итоговых функций принадлежности термов параметров. Это не позволяет проверить работоспособность найденных настроек на других объектах управления. При этом логично предположить, что управление при малом отклонении отклика управляемого объекта Y от целевого значения Y^* (т. е. вблизи нормального режима работы объекта) должно осуществляться аккуратнее, чем при его большом значении, т. е. основания функций принадлежности отдельных термов параметра регулятора должны увеличиваться по мере удаления от его условной нормы. Конкретные значения оснований функций принадлежности в таком случае представляют собой элементы числовой последовательности, одной из возможных форм которой является геометрическая прогрессия.

В данном исследовании рассматриваются вопросы о ее использовании для настройки нечеткого ПИ-подобного логического регулятора, а также о влиянии величины знаменателя прогрессии на качество результирующего переходного процесса. Для этого в среде MATLAB Simulink синтезируется контур управления химико-технологическим объектом с запаздыванием с классическим ПИ-регулятором, на основании которого определяются диапазоны изменения входных и выходных параметров нечеткого логического регулятора ПИ-типа. Далее производится расчет длин оснований термов входных и выходных параметров нечеткого регулятора в предположении, что они образуют геометрические прогрессии с первым членом, равным 1,0, и с различными знаменателями в диапазоне от 1,5 до 3,5, которые затем проецируются на найденные ранее диапазоны изменения параметров. Полученные настройки применяются к нечеткому логическому регулятору ПИ-типа с центральными треугольными и боковыми трапециевидными функциями принадлежности термов его параметров, сконструированному средствами FIS-редактора MATLAB. Результирующие переходные процессы сравниваются между собой и с переходным процессом в случае классического ПИ-регулятора по критериям времени регулирования и максимуму абсолютной величины рассогласования.

Контуры управления на базе классического ПИ-регулятора и нечеткого логического ПИ-подобного регулятора

В качестве объекта управления рассмотрим pH раствора аммиачной селитры в аппарате нейтрализации азотной кислоты аммиаком в зависимости от положения регулирующего органа на линии аммиака в филиале «Азот» АО «ОХК «Уралхим» г. Березники Пермского края. Построенная по нормированным данным передаточная функция объекта имеет вид $W(s) \approx \frac{6}{6974 \cdot s^2 + 152 \cdot s + 1} \cdot e^{-25 \cdot s}$ [14]. Базой сравнения и источником данных для подбора параметров нечеткого регулятора служит блочный ПИ-регулятор, настроенный с помощью средства автоматической настройки MATLAB PID-tuner (рис. 1). Исследование результатов работы соответствующего контура управления позволило установить диапазоны изменения ошибки регулирования Error (от 0 до 3,034), ее интеграла по времени регулирования Error_Int (от 0 до 820,387) и управления Control (от 0 до 1,071). При этом максимум абсолютной величины рассогласования ($\max|\Delta Y(t)|$) составил 3,034, а время регулирования (t_p) – 1989,6 с. (за данный показатель мы выбрали момент времени, когда ошибка регулирования становится стабильно меньше 10^{-4}).

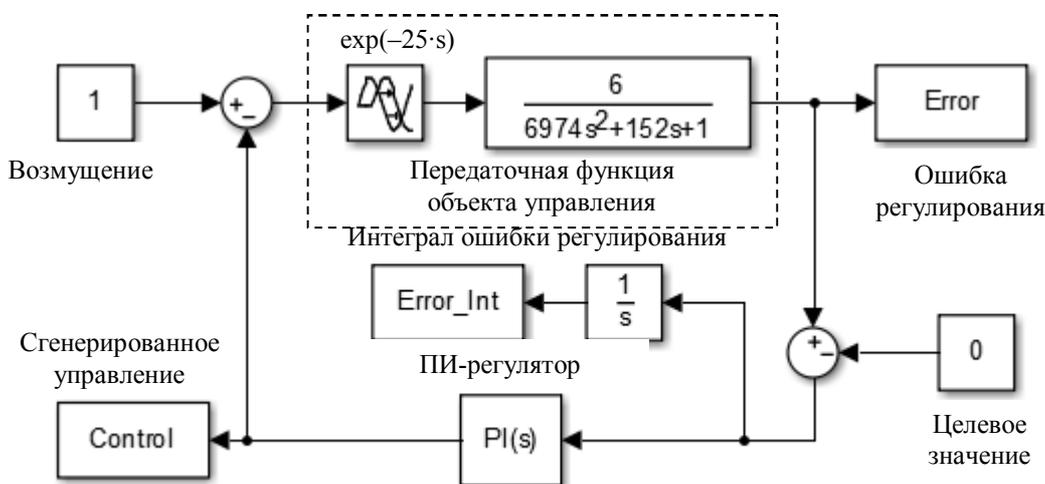


Рис. 1. Контур управления с ПИ-регулятором
Fig. 1. Control loop with PI controller

ПИ-подобный нечеткий логический регулятор для соответствующего контура управления (рис. 2) сконструируем в FIS-редакторе MATLAB, исходя из следующих соображений.

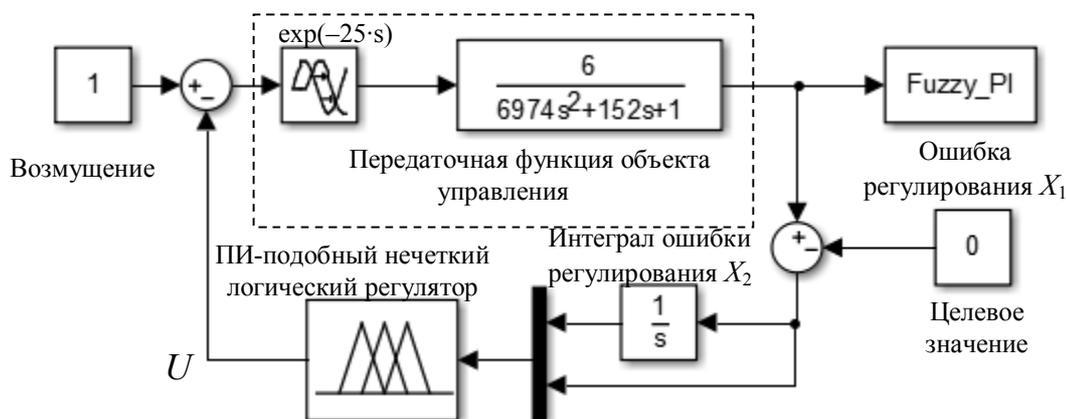


Рис. 2. Контур управления с нечетким ПИ-подобным регулятором
Fig. 2. Control loop with fuzzy PI controller

1. Входные (X_1 и X_2) и выходной (U) параметры регулятора описываются лингвистическими переменными, содержащими пять термов и определяемыми как $L^5 = \{l^5 = \text{«большое отрицатель-»}$

ное» (БО), l^{52} = «малое отрицательное» (МО), l^{53} = «нулевое» (Н), l^{54} = «малое положительное» (МП), l^{55} = «большое положительное» (БП)}.

2. Функции принадлежности термов «малое отрицательное» $\mu_{52}(x)$, «нулевое» $\mu_{53}(x)$ и «малое положительное» $\mu_{54}(x)$ являются треугольными, а термов «большое отрицательное» $\mu_{51}(x)$ и «большое положительное» $\mu_{55}(x)$ – трапециевидными [15]. Треугольные функции принадлежности имеют по три параметра: левый и правый минимумы ($lmin_{5i}$ и $rmin_{5i}$) такие, что $\mu_{5i}(lmin_{5i}) = \mu_{5i}(rmin_{5i}) = 0$, и пиковое значение $peak_{5i}$ такое, что $\mu_{5i}(peak_{5i}) = 1$, $i = 2,3,4$, причем пик нулевого значения симметричен относительно его минимумов, т. е. $peak_{53} = (lmin_{53} + rmin_{53})/2$. Трапециевидные функции принадлежности имеют по 4 параметра: левый и правый минимумы ($lmin_{5i}$ и $rmin_{5i}$) такие, что $\mu_{5i}(lmin_{5i}) = \mu_{5i}(rmin_{5i}) = 0$, и левое и правое пиковые значения $lpeak_{5i}$ и $rpeak_{5i}$ такие, что $\mu_{5i}(lpeak_{5i}) = \mu_{5i}(rpeak_{5i}) = 1$, $i = 1,5$. При этом пик функции принадлежности каждого терма совпадает с минимумами соседних термов (рис. 3), а длины их оснований являются элементами геометрической прогрессии со знаменателем $q > 1$.

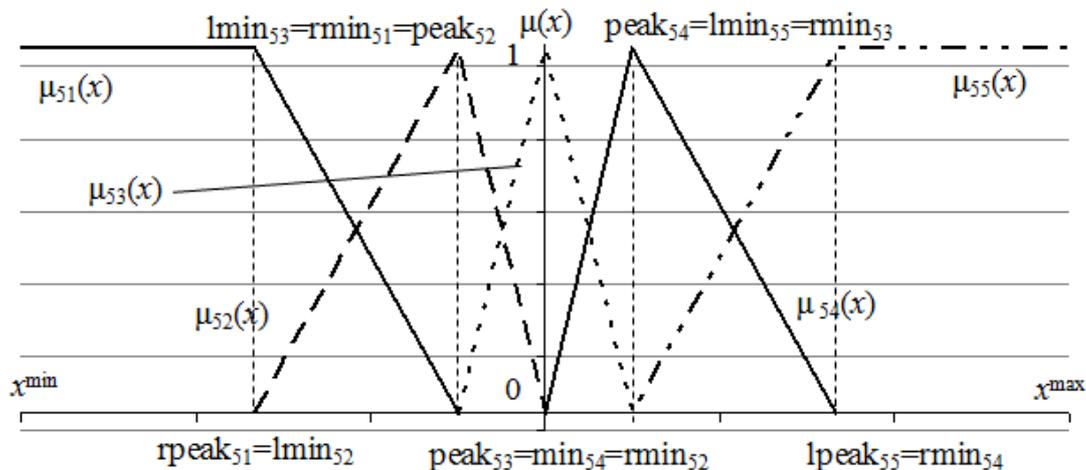


Рис. 3. Лингвистическая переменная с пятью термами
Fig. 3. Linguistic variable with five terms

3. Регулятор является однокомпонентным, т. е. функционирует на основании единой базы правил «если – то», состоящей из 25 правил, определяемой в соответствии с табл. 1.

4. В качестве начального интервала для входного П-параметра НЛР выбирается симметричный относительно нуля интервал вида $[-\max_t |\text{Error}|; +\max_t |\text{Error}|] = [-3,034; 3,034]$.

Матрица знаний для ПИ-подобного нечеткого регулятора

Таблица 1

Table 1

Knowledge matrix for a PI fuzzy controller

	l_{X2}^{51} = БО	l_{X2}^{52} = МО	l_{X2}^{53} = Н	l_{X2}^{54} = МП	l_{X2}^{55} = БП
l_{X1}^{51} = БО	$U = \text{БО}$	$U = \text{БО}$	$U = \text{БО}$	$U = \text{МО}$	$U = \text{Н}$
l_{X1}^{52} = МО	$U = \text{БО}$	$U = \text{БО}$	$U = \text{МО}$	$U = \text{Н}$	$U = \text{МП}$
l_{X1}^{53} = Н	$U = \text{БО}$	$U = \text{МО}$	$U = \text{Н}$	$U = \text{МП}$	$U = \text{БП}$
l_{X1}^{54} = МП	$U = \text{МО}$	$U = \text{Н}$	$U = \text{МП}$	$U = \text{БП}$	$U = \text{БП}$
l_{X1}^{55} = БП	$U = \text{Н}$	$U = \text{МП}$	$U = \text{БП}$	$U = \text{БП}$	$U = \text{БП}$

5. В качестве начального интервала для входного И-параметра НЛР выбирается симметричный относительно нуля интервал вида $[-\max_t |\text{Error_Int}|; +\max_t |\text{Error_Int}|] = [-820,387; 820,387]$.

Управление в технических системах

6. В качестве начального интервала для выходного параметра НЛР выбирается симметричный относительно величины входного возмущения (единицы) интервал вида $[2 - \max_i |\text{Controller_output}|; \max_i |\text{Controller_output}|] = [0,929; 1,071]$.

Расчет параметров функций принадлежности термов входов и выходов нечеткого регулятора

Предположим, что основания функций принадлежности термов l^{53} , l^{52} и l^{54} , l^{51} и l^{55} лингвистической переменной L^5 образуют геометрическую прогрессию с начальным элементом $a_0 = 1$ и знаменателем $q > 1$. Это означает, что основание функции принадлежности $\mu_{53}(x)$ равно $a_0 = 1$, основания функций принадлежности $\mu_{52}(x)$ и $\mu_{54}(x)$ составляют по $a_1 = a_0 \cdot q = 1 \cdot q = q$, а основания функций принадлежности $\mu_{51}(x)$ и $\mu_{55}(x)$ составляют по $a_2 = a_0 \cdot q^2 = 1 \cdot q^2 = q^2$. Результаты расчетов их значений для различных уровней q представлены в табл. 2.

Длины оснований функций принадлежности термов L^5

Таблица 2

The lengths of the bases of the membership functions of the terms L^5

Table 2

Термы	q										
	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5
l^{53}	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
l^{52}, l^{54}	1,50	1,70	1,90	2,10	2,30	2,50	2,70	2,90	3,10	3,30	3,50
l^{51}, l^{55}	2,25	2,89	3,61	4,41	5,29	6,25	7,29	8,41	9,61	10,89	12,25

Ранее мы условились, что пик функции принадлежности каждого термина совпадает с минимумами соседних термов. Тогда в предположении, что пик значения $l^{53} = \text{«нулевое»}$ peak_{53} равняется нулю, можно рассчитать параметры функций принадлежности остальных термов (табл. 3).

Параметры функций принадлежности термов L^5

Таблица 3

The parameters of the membership functions of the terms L^5

Table 3

Термы	Параметры	$q = 1,5$	$q = 1,9$	$q = 2,3$	$q = 2,7$	$q = 3,1$	$q = 3,5$
l^{51}	$lmin_{51}$	-2,75	-4,11	-5,79	-7,79	-10,11	-12,75
	$lpeak_{51}$	-2,75	-4,11	-5,79	-7,79	-10,11	-12,75
	$rpeak_{51}$	-1,5	-1,9	-2,3	-2,7	-3,1	-3,5
	$rlmin_{51}$	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
l^{52}	$lmin_{52}$	-1,5	-1,9	-2,3	-2,7	-3,1	-3,5
	$peak_{52}$	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
	$rmin_{52}$	0	0	0	0	0	0
l^{53}	$lmin_{53}$	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
	$peak_{53}$	0	0	0	0	0	0
	$rmin_{53}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
l^{54}	$lmin_{54}$	0	0	0	0	0	0
	$peak_{54}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	$rmin_{54}$	1,5	1,9	2,3	2,7	3,1	3,5
l^{55}	$lmin_{55}$	0,5	0,5	0,5	2,7	0,5	0,5
	$lpeak_{55}$	1,5	1,9	2,3	7,79	2,7	3,5
	$rpeak_{55}$	2,75	4,11	5,79	7,79	10,11	12,75
	$rmin_{55}$	2,75	4,11	5,79	7,79	10,11	12,75

Данные табл. 3 являются вспомогательными. Будем считать для определенности, что основания функций принадлежности термов обоих входных и выходного параметра нечеткого ПИ-регулятора определяются геометрической прогрессией с одним и тем же знаменателем. Тогда для получения конкретных параметров функций принадлежности термов X_1 и X_2 данные табл. 3 достаточно масштабировать на коэффициент отношения длин фактического интервала соответствующего входного параметра (или его половины) и его расчетного эквивалента. Например, при $q = 1,9$ расчетный интервал составляет $[-4,11; 4,11]$, т. е. имеет длину $4,11 \cdot 2 = 8,22$. Для входных параметров нечеткого регулятора X_1 и X_2 фактические интервалы определены выше как $[-3,034; 3,034]$ и $[-820,387; 820,387]$, т. е. их длина составляет $3,034 \cdot 2 = 6,068$ и $820,387 \cdot 2 = 1\,640,774$ соответственно. Для выходного параметра U фактический интервал определен как $[0,929; 1,071]$, т. е. его длина составляет $0,142$. Тогда для определения параметров функций принадлежности X_1 при $q = 1,9$ необходимо данные соответствующего столбца табл. 3 умножить на коэффициент $\lambda_{1,9}^1 = 6,068/8,22 = 3,387/4,11 \approx 0,74$, а для X_2 – на коэффициент $\lambda_{1,9}^2 = 1\,640,774/8,22 = 820,387/4,11 \approx 199,61$ (табл. 4). Для расчета конкретных параметров функций принадлежности термов U данные столбца табл. 3 необходимо масштабировать на коэффициент $\mu_{1,9} = (1,071 - -0,929)/4,11 \approx 0,035$ и сдвинуть на 1 вправо.

Данные табл. 3 и их аналоги при прочих значениях знаменателя q позволяют настроить 11 ПИ-подобных нечетких логических регуляторов Fuzzy PI 1,5, Fuzzy PI 1,7, Fuzzy PI 1,9, Fuzzy PI 2,1, Fuzzy PI 2,5, Fuzzy PI 2,7, Fuzzy PI 2,9, Fuzzy PI 3,1, Fuzzy PI 3,3 и Fuzzy PI 3,5.

Фактические параметры термов X_1 , X_2 и U при $q = 1,9$

Таблица 4

Table 4

Actual parameters of terms X_1 , X_2 and U at $q = 1.9$

Термы	Параметры	X_1	X_2	U
I^{51}	lmin ₅₁	-3,034	-820,387	0,929
	lpeak ₅₁	-3,034	-820,387	0,929
	rpeak ₅₁	-1,403	-379,254	0,967
	rlmin ₅₁	-0,369	-99,804	0,991
I^{52}	lmin ₅₂	-1,403	-379,254	0,967
	peak ₅₂	-0,369	-99,804	0,991
	rmin ₅₂	0,000	0,000	1,000
I^{53}	lmin ₅₃	-0,369	-99,804	0,991
	peak ₅₃	0,000	0,000	1,000
	rmin ₅₃	0,369	99,804	1,009
I^{54}	lmin ₅₄	0,000	0,000	1,000
	peak ₅₄	0,369	99,804	1,009
	rmin ₅₄	1,403	379,254	1,033
I^{55}	lmin ₅₅	0,369	99,804	1,009
	lpeak ₅₅	1,403	379,254	1,033
	rpeak ₅₅	3,034	820,387	1,071
	rmin ₅₅	3,034	820,387	1,071

Анализ зависимости качества управления ПИ-подобного нечеткого логического регулятора от параметров функций принадлежности термов его входных и выходных переменных

Анализ переходных процессов в контуре управления с ПИ-подобным нечетким логическим регулятором на временном интервале 3 000 с. позволил установить наличие двух их типов. При $q \in \{1,5; 1,7; 1,9; 2,1; 2,7; 3,1; 3,5\}$ ошибка регулирования в рассматриваемом промежутке времени достигает нулевого или близкого к нулевому значения (рис. 4); при $q \in \{2,3; 2,5; 2,9; 3,3\}$ ошибка регулирования колеблется с незатухающей амплитудой в окрестности нулевого значения (рис. 5). Полученные данные позволяют предположить, что для рассматриваемого объекта

управления нечеткие регуляторы, построенные на геометрической прогрессии со знаменателем $q < 2,3$, позволяют добиться удовлетворительного качества регулирования, тогда как при $q \geq 2,3$ соответствующие переходные процессы ведут себя непредсказуемо. Естественно, данное утверждение требует проверки путем перебора значений знаменателя прогрессии $q < 2,3$ с более мелким шагом.

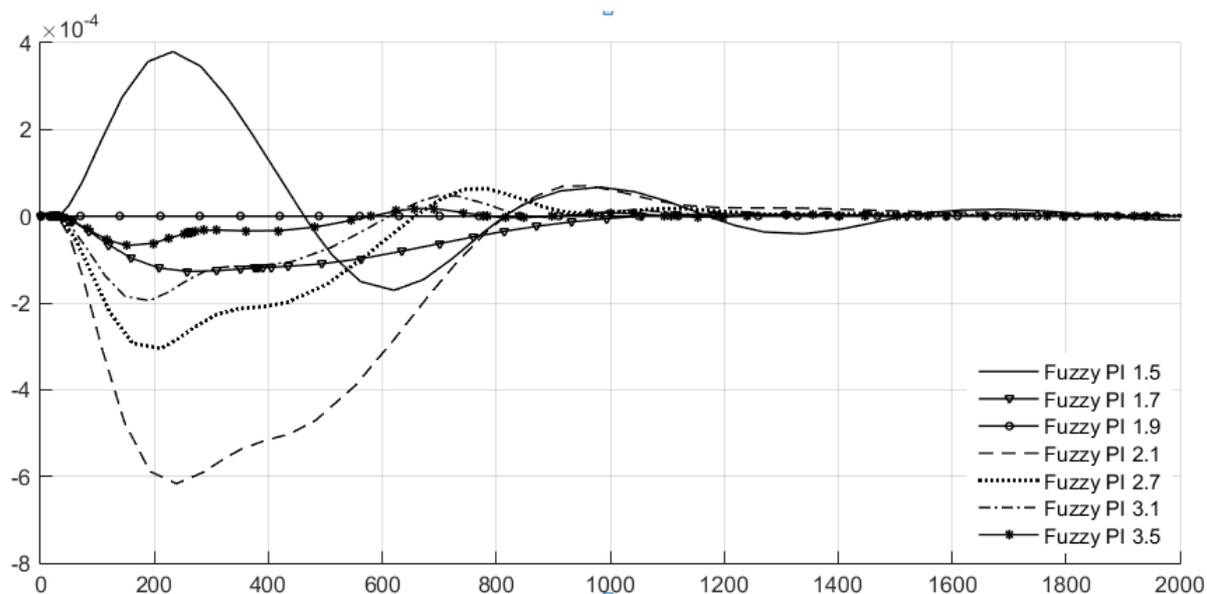


Рис. 4. Переходные процессы при $q \in \{1,5; 1,7; 1,9; 2,1; 2,7; 3,1; 3,5\}$
Fig. 4. Transient processes at $q \in \{1,5; 1,7; 1,9; 2,1; 2,7; 3,1; 3,5\}$

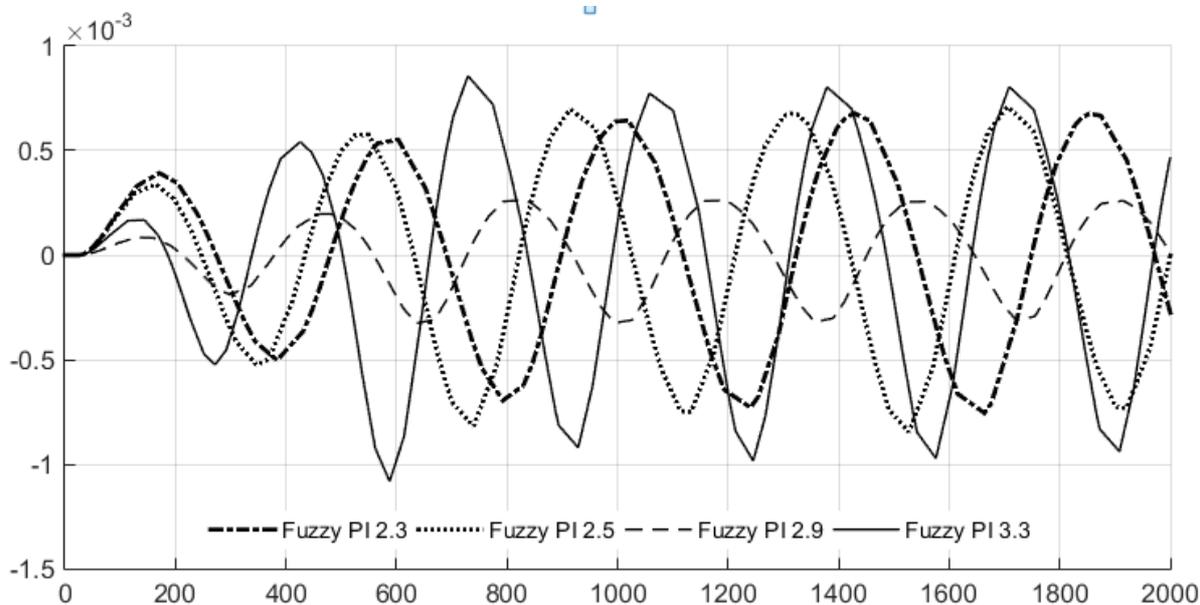


Рис. 5. Переходные процессы при $q \in \{2,3; 2,5; 2,9; 3,3\}$
Fig. 5. Transient processes at $q \in \{2,3; 2,5; 2,9; 3,3\}$

Для оценки качества управления нечетких логических регуляторов первого типа (Fuzzy PI 1,5, Fuzzy PI 1,7, Fuzzy PI 1,9, Fuzzy PI 2,1, Fuzzy PI 2,7, Fuzzy PI 3,1 и Fuzzy PI 3,5) помимо $\max|\Delta Y(t)|$ и t_p было подсчитано количество смен знака переходного процесса N (табл. 5). На основании сравнения полученных показателей между собой, а также с соответствующими показателями работы обычного ПИ-регулятора можно утверждать следующее:

Показатели качества управления нечетких регуляторов

Таблица 5

Control quality indicators of fuzzy regulators

Table 5

Регулятор	$\max \Delta Y(t) $	t_p	N
ПИ-регулятор	3,034	1990	0
Fuzzy PI 1,5	0,00034	762	8
Fuzzy PI 1,7	0,0001	584	1
Fuzzy PI 1,9	0,0	0	0
Fuzzy PI 2,1	0,0006	746	1
Fuzzy PI 2,7	0,0003	585	1
Fuzzy PI 3,1	0,0002	457	3
Fuzzy PI 3,5	0,00007	0	15

– По уровню $\max|\Delta Y(t)|$ все рассмотренные нечеткие регуляторы позволяют добиться существенно лучшего качества управления по сравнению с обычным ПИ-регулятором. При этом регулятор Fuzzy PI 1,9 позволяет добиться нулевого уровня $\max|\Delta Y(t)|$; установить, действительно ли регулятор является «идеальным» или полученный результат есть некая аномалия, без дополнительного исследования не представляется возможным. За исключением Fuzzy PI 1,9 формально лучшее значение данного показателя достигается регулятором Fuzzy PI 3,5.

– По величине времени регулирования t_p все рассмотренные нечеткие регуляторы также демонстрируют значительно лучшие результаты по сравнению с обычным ПИ-регулятором. Лучшими по данному критерию вновь являются регуляторы Fuzzy PI 1,9 и Fuzzy PI 3,5.

– По числу переходов через ноль все рассмотренные нечеткие регуляторы, кроме Fuzzy PI 1,9, уступают классическому ПИ-регулятору. Наихудшие результаты демонстрируют регуляторы с граничными показателями q , т. е. $N_{1,5} = 8$ при $q = 1,5$ и $N_{3,5} = 15$ при $q = 3,5$.

В предположении, что основным критерием является максимум модуля рассогласования при условии минимально возможного числа переходов через ноль и за исключением возможно аномального регулятора Fuzzy PI 1,9, лучшим нечетким регулятором является Fuzzy PI 1,7. При том же ограничении на смену знака рассогласования он также обеспечивает и минимальное время регулирования.

Заключение

Проведенное нами исследование позволяет утверждать, что использование геометрической прогрессии для настройки ПИ-подобных нечетких логических регуляторов позволяет получить весьма неплохие результаты управления. Естественно, как и в случае с обычными ПИД-регуляторами, далеко не все настройки дают удовлетворительное качество управления: при превышении знаменателя прогрессии величины 2,3 поведение системы становится непредсказуемым. Тем не менее показатели качества регулирования семи из одиннадцати нечетких регуляторов значительно превосходит соответствующие показатели классического ПИ-регулятора, при этом обеспечивается сокращение как времени регулирования, так и максимальной абсолютной величины рассогласования. При этом выявлен недостаток управления на нечеткой логике – наличие перехода ошибки регулирования через ноль, иногда не единственного. В связи с этим следует отметить, что при настройке регуляторов мы варьировали только длинами оснований функций принадлежности термов их параметров, т. е. были использованы не все возможности настройки. Кроме того, были рассмотрены регуляторы с параметрами, настроенными посредством геометрической прогрессии с одинаковым знаменателем, и вопрос об использовании разных знаменателей для разных параметров требует дальнейшего изучения. Также в процессе исследования было установлено, что при уровне знаменателя прогрессии $q = 1,9$ ошибка регулирования оказывается нулевой на всем интервале моделирования. Это может означать существование «идеального» ПИ-подобного нечеткого регулятора, однако данное предположение требует дополнительного исследования.

Литература

1. Прикладные нечеткие системы / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи и др.; под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 368 с.
2. Джамбеков, А.М. Нечеткий регулятор стабилизации катализатора / А.М. Джамбеков, И.А. Щербатов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2016. – № 4(52). – С. 106–114.
3. Comparison of Fuzzy-PID and PID Controller for Speed Control of DC Motor using LabVIEW / D. Somwanshi, M. Bunde, G. Kumar, G. Parashar // *Procedia Computer Science.* – 2019. – Vol. 152. – P. 252–260. – <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919306702>.
4. Надеждин, И.С. Системы управления нестационарным объектом на основе MPC-регулятора и ПИД-регулятора с нечеткой логикой / И.С. Надеждин, А.Г. Горюнов, Ф. Маненти // *Управление большими системами.* – 2018. – Вып. 75. – С. 50–75. – http://ubs.mtas.ru/search/search_results_ubs_new.php?publication_id=21760&BLOCK_ID=20.
5. Первушина, Н.А. Разработка методики синтеза нейро-нечеткого регулятора с настройкой генетическим алгоритмом / Н.А. Первушина, Д.Е. Доновский, А.Н. Хакимова // *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей».* – 2018. – № 4. – С. 82–90.
6. Разработка метода адаптации нечеткого регулятора, предназначенного для регулирования технологических параметров / Е.А. Муравьева, Д.С. Радакина, М.И. Шарипов и др. // *Вестник Чувашского университета.* – 2018. – № 1. – С. 137–145.
7. Rodriguez-Castellanos, J.E. A tuning proposal for direct fuzzy PID controllers oriented to industrial continuous processes / J.E. Rodriguez-Castellanos, V.H. Grisales-Palacio, J.E. Cote-Ballesteros // *IFAC PapersOnLine.* – 2018. – Vol. 51, iss. 4. – P. 657–662. – <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318304695>.
8. Pinto, S.E. Castillo Self-tuning neuro-fuzzy generalized minimum variance controller / S.E. Pinto Castillo, M.J. Grimble, R. Katebi // *IFAC Proceedings Volumes.* – 2005. – Vol. 38, iss. 1. – P. 103–108. – <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016371075>.
9. Anantwar, H. Fuzzy self tuning PI controller based inverter control for voltage regulation in off-grid hybrid power system / H. Anantwar, R. Lakshmikantha, Sh. Sundar // *Energy Procedia.* – 2017. – Vol. 117. – P. 409–416. – <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021732386X>.
10. Tamilselvan, G.M. Online tuning of fuzzy logic controller using Kalman algorithm for conical tank system / G.M. Tamilselvan, P. Aarthy // *Journal of Applied Research and Technology.* – 2017. – No. 15. – P. 492–503. – <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1665642317300792>.
11. Grey Wolf Optimizer-Based Approach to the Tuning of PI-Fuzzy Controllers with a Reduced Process Parametric Sensitivity / R.-E. Precup, R.-C. David, E.M. Petriu et al. // *IFAC-PapersOnLine.* – 2016. – Vol. 49, iss. 5. – P. 55–60. – <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316302853>.
12. El-Metwally, Kh.A. Power System Stabilization Using Swarm Tuned Fuzzy Controller / Kh.A. El-Metwally // *IFAC Proceedings Volumes.* – 2008. – Vol. 41, iss.2. – P. 11106–11111. – <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016407500>.
13. Koulocheris, D. Optimization Methodology For Tuning Fuzzy Logic Controllers / D. Koulocheris, H. Vrazopoulos, V. Dertimanis // *IFAC Proceedings Volumes.* – 2002. – Vol. 35, iss. 1. – P. 155–160. – <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147466701540000X>.
14. Затонский, А.В. Программные средства глобальной оптимизации настроек систем автоматического регулирования / А.В. Затонский. – М.: Издательский Центр РИОР. – 2013 – 136 с.
15. Власов, К.П. Теория автоматического управления / К.П. Власов. – Харьков: Изд-во Гуманитарный центр. – 2007. – 526 с.

Копотева Анна Владимировна, канд. техн. наук, доцент кафедры общенаучных дисциплин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, филиал в г. Березники, г. Березники, kopoteva_av@mail.ru.

Поступила в редакцию 11 июня 2020 г.

PI-TYPE FUZZY CONTROLLER TUNING BY MEMBERSHIP FUNCTIONS PARAMETERS DETERMINATION USING GEOMETRIC SERIES

A.V. Kopoteva, kopoteva_av@mail.ru

Perm State National Research Polytechnical University, Berezniki Branch,
Berezniki, Russian Federation

Introduction. In the issue we consider the possibility of geometric series application for fuzzy logic controller tuning. Triangular and trapezoidal membership functions are often used for fuzzy controller parameters description, and determination of those functions bases is a common way to tune the controller. Our related publications review revealed that there is no universal fuzzy controllers tuning method, and that approaches to the problem are usually quite difficult and not sufficiently described to understand and reiterate.

Aim. So for the purpose of our research we assumed that bases of fuzzy controller input and output parameters membership functions could be described with a numerical sequence. In that case the entire tuning procedure may be reduced to mere selection of such numerical sequence parameters.

Materials and methods. Geometric series with unit as a first member were chosen to avoid ambiguity, different ratios from 1.5 to 3.5 with an increment of 0.2 were chosen for second and third series members calculations. Calculated values were used as membership functions term bases for eleven subsidiary linguistic variables. Then we obtained ranges of control, control error and its time integral values variations for a specific control object using automatically tuned PI-controller. Using MATLAB FIS-editor we constructed PI-type fuzzy controller assuming that both of its input and an output parameters has five terms. By projecting the subsidiary linguistic variables gained earlier on each parameter range we obtain eleven different types of PI-type fuzzy controller tunings. They then were applied for time delay technological object controlling, seven of which proved to be functioning.

Results. Comparison of functioning fuzzy controllers' transient processes with corresponding ordinary PI-controller transient process allowed us to determine that all seven PI-type fuzzy controllers' quality criteria values are much better than those of ordinary PI-controller. **Conclusion.** Our research showed that usage of geometric series can be an effective and easy way to obtain fuzzy controllers tunings of satisfactory quality.

Keywords: fuzzy logic controller, membership function, geometric series, control object with time delay, control error, control time, PI-controller.

References

1. Asai K., Vatada D., Ivai S. *Prikladnyye nechetkiye sistemy* [Applied Fuzzy Systems]. Moscow, Mir, 1993. 368 p. (in Russ.)
2. Dzhambekov A.M., Iv. A. Sherbatov. [On Fuzzy Controller Of Catalysate Stabilization]. *Modern technologies. System Analysis. Modeling*, 2016, no. 4(52), pp. 106–114. (in Russ.)
3. Somwanshi D., Bundele M., Kumar G., Parashar G. Comparison of Fuzzy-PID and PID Controller for Speed Control of DC Motor using LabVIEW. *Procedia Computer Science*, 2019, vol. 152, pp. 252–260.
4. Nadezhdin I.S., Goryunov A.G., F.Manenti. [Control Systems Of a Non-Stationary Plant Based On MPC And PID Type Fuzzy Logic Controller]. *Large-Scale Systems Control*, 2018, no. 75, pp. 50–75. (in Russ.)
5. Pervushina N.A., Donovskiy D. E., Khakimova A.N. [Development of Synthetic Methodology of Neuro-Fuzzy Controller Adjusted by Genetic Algorithm]. *Bulletin of Concern VKO «Almaz – Antey»*, 2018, no. 4, pp. 82–90. (in Russ.)
6. Muravyova E., Radakina D., Sharipov M., Enikeeva E., Artykaeva E. [Development of Method of Fuzzy Regulator Adaptation to Regulate Fuzzy Technological Parameters]. *Bulletin of the Chuvash University*, 2018, no. 1, pp. 137–145. (in Russ.)

7. Rodriguez-Castellanos J.E., Grisales-Palacio V.H., Cote-Ballesteros J.E. A Tuning Proposal for Direct Fuzzy PID Controllers Oriented to Industrial Continuous Processes. *IFAC PapersOnLine*, 2018, vol. 51, no. 4, pp. 657–662. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318304695>.
8. Pinto Castillo S.E., Grimble M.J., Katebi R. Self-tuning Neuro-fuzzy Generalized Minimum Variance. *IFAC Proceedings Volumes*, 2005, vol. 38, no. 1, pp. 103–108. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016371075>.
9. Anantwar H., Lakshmikantha R., Sundar Sh. Fuzzy Self Tuning PI Controller Based Inverter Control for Voltage Regulation in off-grid Hybrid Power System. *Energy Procedia*, 2017, vol. 117, pp. 409–416. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021732386X>.
10. Tamilselvan G.M., Aarthi P. Online Tuning of Fuzzy Logic Controller Using Kalman Algorithm for Conical Tank. *Journal of Applied Research and Technology*, 2017, no. 15, pp. 492–503. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1665642317300792>.
11. Grey W., Precup R.E., David R.C., Petriu E.M., Szedlak-Stinean A.I., Bojan-Dragos C.A. Optimizer-Based Approach to the Tuning of PI-Fuzzy Controllers with a Reduced Process Parametric Sensitivity. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, vol. 49, no. 5, pp. 55–60. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316302853>.
12. El-Metwally Kh.A. Power System Stabilization Using Swarm Tuned Fuzzy Controller. *IFAC Proceedings Volumes*, 2008, vol. 41, no. 2, pp. 11106–11111. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016407500>.
13. Koulocheris D., Vrazopoulos H., Dertimanis V. Optimization Methodology For Tuning Fuzzy Logic Controllers. *IFAC Proceedings Volumes*, 2002, vol. 35, no. 1, pp. 155–160. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S147466701540000X>.
14. Zatonskii A.V. *Programmnye sredstva global'noi optimizatsii nastroek sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Software of global optimization of systems of automatic control: monograph]. Moscow, Izdatel'skii Tsentr RIOR, 2013. 136 p. (in Russ.)
15. Vlasov K.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic Control Theory]. Khar'kov, Izdvo Gumanitarnyy tsentr, 2007. 526 p. (in Russ.)

Received 11 June 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Копотева, В.А. Использование геометрической прогрессии для определения параметров функций принадлежности при настройке нечеткого регулятора ПИ-типа / А.В. Копотева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радио-электроника». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 18–28. DOI: 10.14529/ctcr200302

FOR CITATION

Kopoteva A.V. PI-type Fuzzy Controller Tuning by Membership Functions Parameters Determination Using Geometric Series Models for Coordinated Integrated Assessment in Decision-Making Problems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 18–28. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200302