

**САВКИН А. Е., СЕРГЕЕВ Н. О., КОПОТЕВА А. В.**  
**ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СИНТЕЗА ПИД-ПОДОБНЫХ НЕЧЕТКИХ**  
**РЕГУЛЯТОРОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ОБЪЕКТАМИ**  
**С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ**

*УДК 681.5:66.02, ГРНТИ 50.09.47*

Об особенностях синтеза ПИД-подобных  
нечетких регуляторов при управлении  
объектами с запаздыванием

On the Peculiarities of Synthesizing  
PID-Like Fuzzy Controllers for  
Controlling Objects with Delay

**А. Е. Савкин, Н. О. Сергеев,  
А. В. Копотева**

**A. E. Savkin, N. O. Segreev,  
A. V. Kopoteva**

Березниковский филиал  
ФГАОУ ВО Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет, г. Пермь

Berezniki branch  
Federal State Autonomous  
Educational Institution of Higher  
Education Perm National Research  
Polytechnic University, Perm

*Рассмотрено применение нечеткого  
логического регулятора для управления  
химико-технологическим объектом с  
запаздыванием. Описан процесс его  
синтеза, включая создание базы правил.  
Проведено моделирование переходных  
процессов. Показано преимущество  
данного подхода по сравнению с  
использованием традиционных ПИД-  
регуляторов.*

*The application of a fuzzy logic  
controller for controlling a chemical-  
technological object with delay is  
considered. The process of its  
synthesis is described, including the  
creation of a rule base. Transient  
processes are modeled. The  
advantage of this approach compared  
to the use of traditional PID  
controllers is shown.*

**Ключевые слова:** химическая  
технология, регулирование, нечеткая  
логика

**Keywords:** chemical  
engineering, control, fuzzy logic

## **Введение**

В настоящее время в силу большого теоретического и прикладного значения существенный интерес представляет управление на базе искусственного интеллекта вообще и нечеткой логики в частности. Поскольку при настройке ПИД-подобных нечетких логических регуляторов (НЛР) пик функции принадлежности «нулевого» терма управляющего параметра соответствует величине входного возмущения, то при малых значениях ошибки на начальном этапе моделирования нечеткий регулятор генерирует управление, соответствующее нулевому рассогласованию и равное величине возмущения. Это приводит к некорректной динамике переходного процесса. Несмотря на большое количество отечественных и зарубежных работ, посвященных

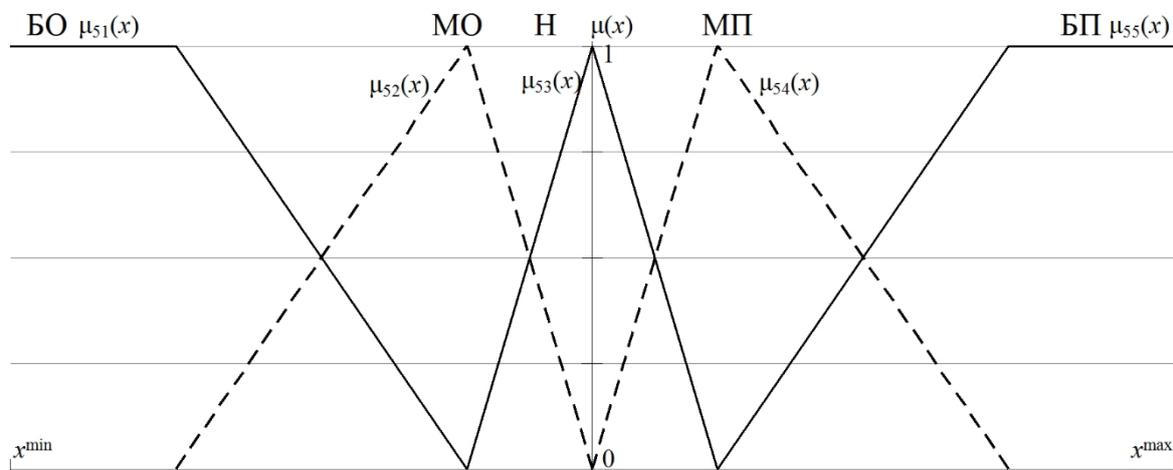
конструированию и настройке ПИД-подобных нечетких логических регуляторов [1, 2], данная проблема в них не рассматривается. В данном исследовании предложен и реализован метод, позволяющий в некоторой степени исправить описанный недостаток управления на базе ПИД-подобных НЛР. Для этого на примере контура управления рН раствора аммиачной селитры в аппарате нейтрализации азотной кислоты аммиаком в зависимости от положения регулирующего органа на линии аммиака в филиале «Азот» ОАО ОХК «Уралхим» средствами Matlab Fuzzy Editor и Simulink выполнены проектирование и настройка ПИ-подобного НЛР, а также изменение результирующей схемы САУ с целью искомой коррекции динамики переходного процесса.

### **Проектирование и настройка ПИ-подобного НЛР для управления рН раствора аммиачной селитры в аппарате нейтрализации азотной кислоты аммиаком в зависимости от положения регулирующего органа на линии аммиака**

Проектирование ПИД-подобного НЛР предполагает выбор его типа, количества и состава термов лингвистических переменных, описывающих входные и выходные параметры, а также вида функций принадлежности термов [3]. ПИ-подобные НЛР как правило не обеспечивают достаточного качества управления по причине своей чрезмерной простоты. При этом изменение параметров входной Д-компоненты существенно влияет на качество нечеткого управления и требует качественной настройки. Поэтому для целей данного исследования был выбран ПИ-подобный НЛР. Его реализация возможна как в виде единого блока с двумя входами ( $P$ -вход и  $I$ -вход), одним выходом (управление  $U$ ) и единой базой правил, либо в виде пары блоков, генерирующих совокупное управление как сумму двух частичных управлений  $U=U_1+U_2$  путем обработки каждого из входов ( $P$ -входа и  $I$ -входа соответственно) на основании двух отдельных баз правил. Если ограничиться числом термов лингвистической переменной  $L$  для каждого параметра  $n=5$  и их составом {«большое отрицательное» (БО); «малое отрицательное» (МО); «нулевое» (Н); «малое положительное» (МП); «большое положительное» (БП)}, то матрица знаний для построения базы правил моноблочного ПИ-подобного НЛР будет включать всего 25 элементов (таблица 1). В силу простоты и удобства настройки выберем для термов «большое отрицательное» и «большое положительное» функции принадлежности  $\mu_{51}(x)$  и  $\mu_{55}(x)$  в форме трапеций, а для термов «малое отрицательное», «нулевое» и «малое положительное» – в форме треугольников  $\mu_{52}(x)$ ,  $\mu_{53}(x)$  и  $\mu_{54}(x)$  (рисунок 1). Отношение оснований функций принадлежности термов выберем в виде геометрической прогрессии с основанием  $q$ , подлежащим подбору для обеспечения приемлемого качества регулирования [4, 5].

Таблица 1. Матрица знаний для ПИ-подобного НЛР с 5 термами

		Значения входного П-параметра				
		БО	МО	Н	МП	БП
Значения входного И-параметра	БО	БО	БО	БО	МО	Н
	МО	БО	БО	МО	Н	МП
	Н	БО	МО	Н	МП	БП
	МП	МО	Н	МП	БП	БП
	БП	Н	МП	БП	БП	БП

Рисунок 1. Лингвистическая переменная  $L_5$  с пятью термами

В качестве объекта исследования рассмотрим контур управления  $pH$  раствора аммиачной селитры в аппарате нейтрализации азотной кислоты аммиаком в зависимости от положения регулирующего органа на линии аммиака в филиале «Азот» ОАО ОХК «Уралхим» [6] с передаточной функцией вида  $W_2(s) \approx \frac{0,2}{205 \cdot s^2 + 30 \cdot s + 1} \cdot e^{-5s}$ . В качестве входного возмущающего воздействия выберем единичный скачок. Диапазоны изменения входных и выходного параметров регулятора определяются на основании изучения работы САУ с обычным ПИ-регулятором. Параметры такого регулятора рассчитываются средствами Matlab Simulink PID Tuner. Установлено, что ошибка управления Error изменяется в диапазоне от 0 до 0,10, интеграл ошибки управления Error Integral – в диапазоне от 0 до 4,93, управление Controller output – от 0 до 1,07. Тогда в качестве начального интервала для входного П-параметра НЛР выбирается симметричный относительно нуля интервал вида  $[-\max_i |\text{Error}|; +\max_i |\text{Error}|] = [-0,10; 0,10]$ , для И-параметра – интервал  $[-\max_i |\text{Error Integral}|; +\max_i |\text{Error Integral}|] = [-4,93; 4,93]$ , а в качестве начального интервала для выходного параметра НЛР выбирается симметричный относительно величины входного

возмущения (единицы) интервал вида  $[2 - \max_t |\text{Controller output}|; \max_t |\text{Controller output}|] = [0,93; 1,07]$ .

Таким образом, определены все необходимые для конструирования и настройки нечеткого ПИ-регулятора элементы, кроме знаменателя геометрической прогрессии для определения соотношения оснований функций принадлежности термов. Его подбор был выполнен экспериментально. Оказалось, что регулятор, построенный с использованием знаменателя  $q=2$ , обеспечивает приемлемое качество управления и вид переходного процесса (рисунок 2).

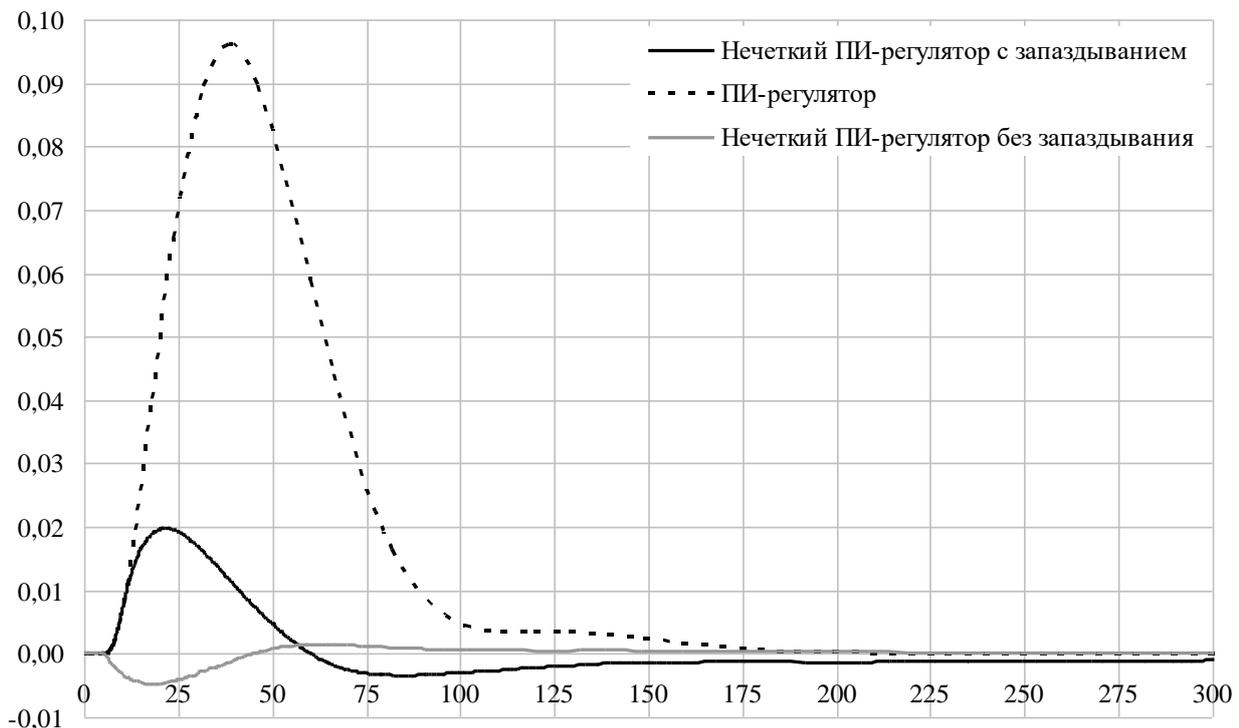


Рисунок 2. Переходные процессы в САУ с классическим и нечеткими ПИ-регуляторами

### Модификация схемы САУ с ПИ-подобным НЛР с целью сокращения влияния генерации нечеткого управления на протяжении времени запаздывания

Сравнительный анализ переходных процессов показывает, что динамика САУ с нечетким ПИ-регулятором и с классическим ПИ-регулятором существенно различаются: вместо нарастания ошибки управления в первые 50 с моделирования имеет место ее убывание (рисунок 2). Как уже отмечалось выше, это происходит по причине особенностей настройки выходного параметра нечеткого регулятора. Для компенсации входного возмущения он должен выдавать управление, равное этому возмущению по модулю и противоположное по знаку. Поэтому в начальные моменты времени при малой ошибке управления нечеткий регулятор выдает отрицательное управление для компенсации ожидаемого возмущения. Отрицательная ошибка при этом,

естественно, накапливается. Наиболее простым и очевидным вариантом модификации схемы является ввод запаздывания выхода регулятора, например, равного запаздыванию объекта управления (рисунок 3). Анализ графиков переходных процессов с запаздыванием управления и без него позволяет утверждать, что динамика ошибки для случая управления с запаздыванием позволяет добиться желаемого эффекта (рисунок 2): ее график располагается в положительной полуплоскости. Отметим, что в результате включения в схему с НЛР запаздывания управления увеличивается время регулирования: в момент времени  $t=300$  ошибка регулирования составляет порядка  $-10^{-3}$ , в момент времени  $t=500$  ее величина уменьшается до  $-4 \cdot 10^{-4}$ , т.е. регулятор с запаздыванием требует дополнительной настройки. Возможным решением является подбор времени запаздывания управления, меньшего, чем время запаздывания объекта управления. Тем не менее, даже в имеющемся виде он не только обеспечивает требуемую форму переходного процесса, но и очевидно, лучшее качество регулирования по сравнению с обычным ПИ-регулятором.

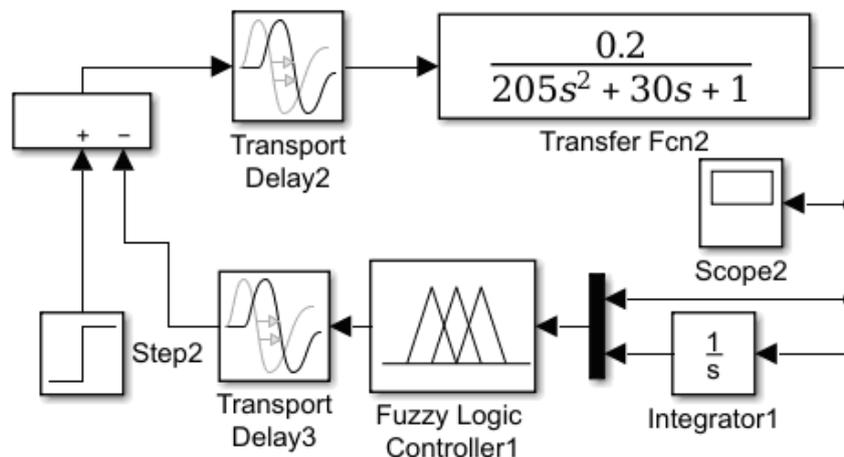


Рисунок 3. Схема САУ с нечетким ПИ-регулятором с запаздыванием

## Заключение

Переходные процессы с нечеткими регуляторами при управлении объектами с запаздыванием имеют некорректную форму вследствие генерации большого отрицательного управления в начальные моменты моделирования. В качестве возможного варианта решения проблемы в данной работе предложено включение в схему управления запаздывания выхода нечеткого регулятора. Работоспособность такого метода проверена на примере контура управления рН раствора аммиачной селитры в аппарате нейтрализации азотной кислоты аммиаком в филиале «Азот» ОАО ОХК «Уралхим» средствами Matlab Fuzzy Editor и Simulink. Установлено, что добавление в схему САУ с настроенным ПИ-подобным нечетким регулятором блока запаздывания выхода регулятора позволяет необходимым образом скорректировать динамику переходного процесса.

### Список использованных источников и литературы

1. Варшней А., Гупта Д., Двиведи Бх. Скоростной отклик бесщеточного двигателя постоянного тока с использованием нечеткого ПИД-регулятора в условиях изменяющейся нагрузки // Журнал электрических систем и информационных технологий. Том 4, Выпуск 2. 2017. С. 310-321. Наин З. М. Разработка системы управления позиционированием сервопривода с применением пид-регулятора и контроллера нечеткой логики // Известия вузов. Электроника. 2021. №6. С.583-585.
2. Гостев В. И. Проектирование нечетких регуляторов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 416 с.
3. Копотева А. В. Использование геометрической прогрессии для определения параметров функций принадлежности при настройке нечеткого регулятора ПИ-типа // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, № 3. С. 18–28.
4. Затонский А. В., Уфимцева В. Н. Разработка объектных средств имитационного и многоагентного моделирования производственных процессов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2018. № 4. С. 56-62.
5. Затонский А. В., Копотева А. В. Алгоритм нахождения произведения четких и нечетких вероятностей и его программная реализация // Программные продукты и системы. 2014. № 2. С. 84-88.

### List of references

1. Varshney A., Gupta D., Dwivedi Bh. Speed response of brushless DC motor using fuzzy PID controller under varying load condition // Journal of Electrical Systems and Information Technology. Volume 4, Issue 2. 2017. Pp. 310-321.
2. Gostev V.I. Design of fuzzy controllers. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2011. 416 p.
3. Kopoteva A. V. Using a geometric progression to determine the parameters of membership functions when setting up a PI-type fuzzy controller // Vestnik SUSU. Series “Computer technologies, control, radio electronics”. 2020. Vol. 20, No. 3. pp. 18–28.
4. Zatonsky A.V., Ufimtseva V.N. Development of object-based tools for simulation and multi-agent modeling of production processes // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer technology and information science. 2018. No. 4. P. 56-62.
5. Zatonsky A.V., Kopoteva A.V. Algorithm for finding the product of clear and fuzzy probabilities and its software implementation // Software Products and Systems. 2014. No. 2. P. 84-88.