

А. Б. Филимонов, д-р техн. наук, проф., filimon_ab@yandex.ru,
МИРЭА — Российский технологический университет,
Н. Б. Филимонов, д-р техн. наук, проф., nbfilimonov@mail.ru,
МГУ им. М. В. Ломоносова, ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН

Некоторые проблемные аспекты нечеткого ПИД регулирования

В последнее время на волне возросшего интереса к технологиям искусственного интеллекта в системах управления техническими объектами и технологическими процессами все чаще находят применение нечеткие регуляторы. Данные регуляторы осуществляют процесс выработки управляющих воздействий на базе нечеткой логики, применение которой обеспечивает проектирование систем управления, способных функционировать в условиях неполноты и нечеткости знаний о динамике объекта управления.

Нечеткие регуляторы открыли новое направление в области автоматического управления и, согласно мнению многих специалистов, имеют многообещающее будущее.

В настоящей работе анализируются динамические характеристики и алгоритмические особенности систем нечеткого ПИД регулирования, проводится сравнение качества процессов четкого и нечеткого регулирования.

Проведенный анализ позволяет констатировать отсутствие каких-либо реальных преимуществ нечетких регуляторов по сравнению с классическими четкими регуляторами. Более того, можно выделить ряд проблемных аспектов методологии нечеткого регулирования, важных для практической автоматики:

- алгоритмы нечеткого регулирования существенно сложнее традиционных четких алгоритмов регулирования;
- тезис о преимуществах нечетких регуляторов представляется сомнительным, поскольку каждый такой регулятор возможно заменить более эффективным и структурно менее сложным четким регулятором;
- спорным является тезис о том, что на основе нечеткого подхода удастся синтезировать работоспособные системы регулирования без априорных знаний и предпроектного обследования динамических свойств объектов регулирования;
- нечеткий подход является сугубо эмпирическим и не позволяет на теоретическом уровне решать вопросы устойчивости, динамического качества и робастности синтезируемых систем регулирования;
- алгоритмы нечеткого регулирования не применимы к сложным динамическим объектам. В частности, это касается многосвязных объектов регулирования и объектов с запаздыванием;
- методология нечеткого регулирования не позволяет решать важные для инженерной практики вопросы оптимизации процессов регулирования.

Ключевые слова: нечеткая логика, ПИД регуляторы, алгоритм нечеткого вывода Мамдани, анализ процессов регулирования, эффективность алгоритмов регулирования

"Нечеткие ПИД регуляторы должны рассматриваться как обычные регуляторы с усложненной структурой, не дающие улучшения качества регулирования"

В. Я. Ротач

Введение

Нечеткая логика как научное направление, предложенное в работах Лотфи Заде (Lotfi Askar Zadeh) [1], прошла путь от почти антинаучной и практически отвергнутой теории до бума конца 20-го века, когда она превратилась в весьма популярный прикладной математический аппарат, а в Японии, США и Германии появилась "нечеткая" бытовая техника (бритвы, пылесосы, фото- и видеокамеры, стиральные машины, кондиционеры, микроволновые печи), а также приложения на основе нечеткой логики в промышленности, финансовой сфере и медицине [2, 3].

Согласно мнению большинства специалистов, у нечеткой логики многообещающее будущее: стремительное развитие теоретического

аппарата и средств моделирования, расширение сфер применения и широкое распространение fuzzy-приложений позволяют надеяться, что со временем они вытеснят некоторые решения, основанные на традиционных классических методах.

В последнее время на волне возросшего интереса к технологиям искусственного интеллекта в системах управления техническими объектами и технологическими процессами все чаще находят применение так называемые нечеткие регуляторы (*англ.* fuzzy controller), которые осуществляют процесс выработки управляющих воздействий на базе нечеткой логики [4–10]. Применение нечеткой логики обеспечивает проектирование систем управления, способных функционировать в условиях неопределенности, неполно-

ты и нечеткости знаний о динамике объекта управления.

Нечеткие регуляторы открыли новое направление в области автоматического управления, основанное на применении знаний специалистов об алгоритмах управления конкретным типом объектов автоматизации, представленных в форме лингвистических баз нечетких продукционных правил.

Широкому распространению нечетких регуляторов в немалой степени способствует программная система MATLAB, включающая пакет программ Fuzzy Logic Toolbox, позволяющий разрабатывать алгоритмы обработки данных и принятия решения на базе нечеткой логики [11, 12].

До последнего времени весьма востребованными в практической автоматике являются типовые пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы [13, 14]. Однако в последнее время все больший теоретический и прикладной интерес вызывают вопросы построения ПИД регуляторов на основе нечеткой методологии. В ряде работ предприняты попытки сравнительного анализа эффективности четких и нечетких алгоритмов регулирования, причем сегодня основополагающей является точка зрения, что алгоритмы нечеткого регулирования более эффективны по сравнению с алгоритмическими решениями классической теории регулирования (см., например, работы [15–24]).

Основной причиной малого промышленного применения нечетких регуляторов является сложность их реализации. Так, для проектирования нечеткого ПИД регулятора необходимо составлять довольно громоздкую трехмерную таблицу нечеткого вывода в соответствии с лингвистическими оценками трех слагаемых в законе регулирования — пропорционального, интегрального и дифференциального. Также одним из ключевых недостатков нечетких регуляторов является проблематичность задания функций принадлежности нечетких терм-множеств лингвистических переменных, поскольку их выбор существенно влияет на процессы нечеткого регулирования.

На наш взгляд, важное методологическое значение имеют работы В. Я. Ротача [25, 26], в которых проводится сравнительный анализ эффективности четких и нечетких регуляторов. Прочитав основные выводы данного анализа:

- "Качество работы фазы-регуляторов не может оказаться выше качества работы традиционных хотя бы потому, что при разработке фазы-регуляторов проблема качества регулирования просто не ставилась";
- "Фазы-ПИД регулятор намного более сложен для реализации, чем традиционный. Достижимое качество регулирования фазы-ПИД регулятора всегда хуже, чем традиционных регуляторов, точнее, фазы-ПИД регуляторы приближаются по своим характеристикам к традиционным по мере увеличения числа термов".

Итак, следует констатировать, что в теории и практике нечеткого регулирования имеется много открытых вопросов методологического характера. Обсуждению некоторых из них, ранее затронутых в работе авторов [27, 28], посвящена настоящая статья.

Сравнительный анализ методов четкого и нечеткого ПИД регулирования

Обратимся к классической схеме автоматического регулирования (САР), представленной на рис. 1. Здесь u и y — соответственно управляющий вход и управляемый выход объекта; y^* — уставка (задание); ε — ошибка регулирования (рассогласование):

$$\varepsilon = y^* - y.$$

Для апробирования алгоритмов регулирования выбран линейный стационарный объект регулирования второго порядка с передаточной функцией

$$W_0(s) = \frac{K_0}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

и параметрами $K_0 = 1$, $T_1 = T_2 = 3$.

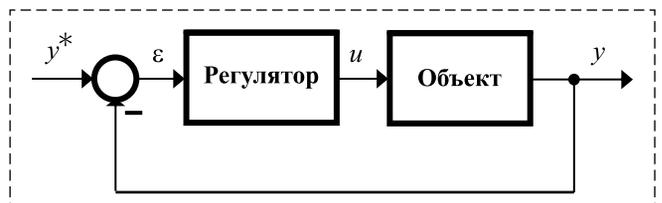


Рис. 1. Структурная схема САР
Fig. 1. Block diagram of automatic control system

Синтез четкого ПИД регулятора

Классический закон ПИД регулирования можно представить уравнениями:

$$u = u_P + u_I + u_D; \quad (1)$$

$$u_P = K_P x_P, \quad x_P = \varepsilon; \quad (2)$$

$$u_I = K_I x_I, \quad x_I = \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau; \quad (3)$$

$$u_D = K_D x_D, \quad x_D = \dot{\varepsilon}. \quad (4)$$

Здесь явно выделены пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющие регулирующего воздействия.

Передаточная функция замкнутой САР равна

$$W(s) = \frac{M(s)}{D(s)},$$

где $M(s) = \frac{K_0}{T_1 T_2} (K_D s^2 + K_P s + K_I);$

$$D(s) = s^3 + \frac{T_1 + T_2 + K_0 K_D}{T_1 T_2} s^2 + \frac{1 + K_0 K_P}{T_1 T_2} s + \frac{K_0 K_I}{T_1 T_2}.$$

Для объектов второго порядка ПИД регуляторы обеспечивают возможность модальной

настройки САР. Пусть $D^*(s)$ — желаемый характеристический многочлен замкнутой системы:

$$D^*(s) = s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0.$$

Для частного случая кратных корней

$$D^*(s) = (s + (1/T))^3, \quad (5)$$

так что $\alpha_0 = (1/T)^3$, $\alpha_1 = 3/T^2$, $\alpha_2 = 3/T$.

Данный результат обеспечивается следующими параметрами регулятора:

$$K_P = (1/K_0)(\alpha_1 T_1 T_2 - 1);$$

$$K_I = (1/K_0)\alpha_0 T_1 T_2;$$

$$K_D = (1/K_0)(\alpha_2 T_1 T_2 - T_1 - T_2).$$

Выберем вариант кратных корней (5), причем положим $T = 1$. Тогда

$$K_P = 26, \quad K_I = 9, \quad K_D = 21. \quad (6)$$

На рис. 2 показана переходная характеристика синтезированной САР.

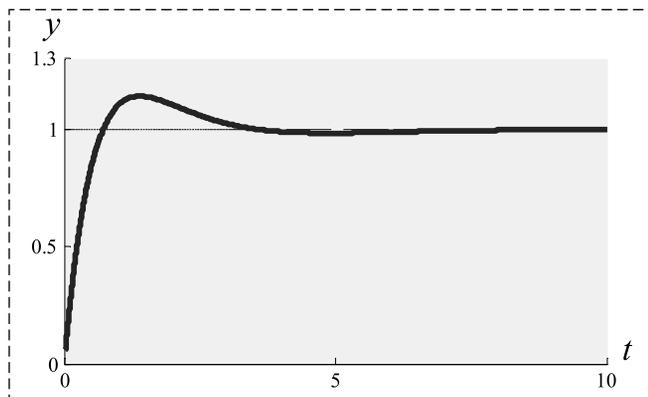


Рис. 2. Процесс четкого ПИД регулирования
Fig. 2. Process of clear PID-regulation

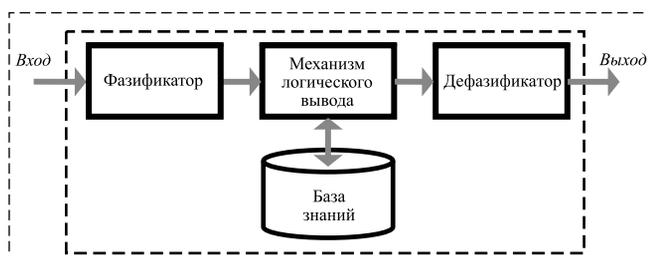


Рис. 3. Система нечеткого логического вывода
Fig. 3. Fuzzy inference system

Синтез нечеткого ПИД регулятора

Системы нечеткого логического вывода.

Процессы нечеткого регулирования реализуются на базе систем нечеткого логического вывода (FIS, Fuzzy Interference System). Такие системы состоят из четырех компонентов: базы знаний, фазификатора, механизма логического вывода и дефазификатора (рис. 3).

Известны четыре классических алгоритма нечеткого вывода: Мамдани, Сугено, Ларсена, Цукамото. Далее мы ограничимся рассмотрением алгоритма нечеткого вывода Мамдани [29].

База знаний включает следующие компоненты:

- описание лингвистических переменных;
 - базу данных, содержащих описание функций принадлежности;
 - набор нечетких высказываний (продукций) в форме "ЕСЛИ-ТО"; левая часть каждого высказывания — конъюнкция элементарных перцепционных условий, а правая часть — множество элементарных действий.
- Фазификатор* вычисляет степени истинности предпосылок каждой продукции исходя из значения входных величин.

Механизм логического вывода выполняет следующие две операции. Во-первых, для каждой продукции вычисленное значение истинности предпосылок применяется к заключению посредством использования нечеткой логики "И". Во-вторых, выполняется операция композиции: объединяются вместе нечеткие подмножества заключений для формирования одного нечеткого подмножества для каждой переменной вывода. С этой целью используется нечеткая логика "ИЛИ".

Дефазификатор трансформирует нечеткие результаты для переменных вывода в четкие значения.

Переход от схемы регулирования (1)–(4) к алгоритмам нечеткого регулирования основан на замене динамических переменных лингвистическими.

Состав входных лингвистических переменных алгоритма нечеткого регулирования очевиден — x_p, x_I, x_D . При разработке алгоритмов нечеткого вывода возможно применение как лингвистической переменной u , так и лингвистических переменных u_p, u_I, u_D .

Далее условимся считать, что все рассматриваемые лингвистические переменные имеют одно и то же базовое терм-множество наименований:

$$T^* = \{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}, \quad (7)$$

где

- NB (Negative Big) — отрицательное большое;
- NM (Negative Middle) — отрицательное среднее;
- NS (Negative Small) — отрицательное малое;
- Z (Zero) — нуль (близкое к нулю);
- PS (Positive Small) — положительное малое;
- PM (Positive Middle) — положительное среднее;
- PB (Positive Big) — положительное большое.

В качестве функций принадлежности данных термов примем кусочно-линейные функции принадлежности, причем для крайних термов NB и PB они будут иметь трапецевидную форму, а для внутренних (т.е. остальных) — треугольную.

Традиционный подход к построению нечеткого регулятора заключается в построении его как целостной системы, на базе нечеткого логического вывода формирующей регулируемую переменную u . В этом случае база продукции будет состоять из нечетких высказываний вида

ЕСЛИ $x_p = \tilde{x}_p$ И $x_I = \tilde{x}_I$ И $x_D = \tilde{x}_D$, ТО $u = \tilde{u}$,

где $\tilde{x}_p \in T(x_p)$, $\tilde{x}_I \in T(x_I)$, $\tilde{x}_D \in T(x_D)$, $\tilde{u} \in T(u)$ — лингвистические термы переменных, а $T(x_p)$, $T(x_I)$, $T(x_D)$, $T(u)$ — терм-множества.

Поскольку

$$T(x_p) = T(x_I) = T(x_D) = T(u) = T^*,$$

то соответствующая база знаний будет содержать $N_1 = 7^3 = 343$ нечеткие продукции. Ясно, что безошибочное и обоснованное составление такого числа продукции довольно проблематично.

Существенного упрощения алгоритма нечеткого регулирования удастся достигнуть посредством декомпозиции управления (1) и параллельного формирования переменных u_p, u_I, u_D посредством сепаратных FIS-блоков. Для описания лингвистических значений этих переменных снова воспользуемся терм-множеством (7):

$$T(u_p) = T(u_I) = T(u_D) = T^*.$$

В этом случае потребуется всего лишь $N_1 = 3 \times 7 = 21$ продукция вида

$$\text{ЕСЛИ } x_p = \tilde{x}_p, \text{ ТО } u_p = \tilde{u}_p; \quad (8)$$

$$\text{ЕСЛИ } x_I = \tilde{x}_I, \text{ ТО } u_I = \tilde{u}_I; \quad (9)$$

$$\text{ЕСЛИ } x_D = \tilde{x}_D, \text{ ТО } u_D = \tilde{u}_D. \quad (10)$$

Может создаться ложное мнение, что именно в данных продукциях должна воплощаться вариативность формируемых алгоритмов регулирования. На самом деле структура этих продукции предопределена свойством функциональной *монотонности* регулирующих обратных связей: чем больше рассогласование, тем больше управляющее воздействие (разумется, вне режима насыщения). Заметим, что в структуре обычного ПИД регулятора (1)–(4) данное свойство отражают положительные коэффициенты усиления K_p, K_I и K_D .

Требованию функциональной монотонности действий нечеткого регулятора отвечают лишь следующие варианты продукции (8)–(10):

$$\text{ЕСЛИ } x_* = \tilde{t}, \text{ ТО } u_* = \tilde{t} \quad (t \in T^*),$$

т.е. лингвистические значения выхода и входа должны совпадать.

Функции принадлежности лингвистических термов. Итак, настраиваемыми элементами FIS-блоков нечеткого регулятора являются функции принадлежности лингвистических термов переменных x_p , x_I , x_D , u_p , u_I , u_D , число которых равно $N_2 = 6 \times 7 = 42$, и задача синтеза нечеткого ПИД регулятора сводится к построению этих функций принадлежности.

Процессы четкого и нечеткого регулирования имеет смысл сравнивать лишь в условиях сопоставимых режимов регулирования. Если исходить из настройки четкого ПИД регулятора (6), то схожий режим нечеткого регулирования будет реализован посредством продукций с нечеткими множествами, представленными

на рис. 4. Поскольку в FIS-алгоритмах допустимые значения входных переменных x_p , x_I , x_D ограничены (рис. 4), то в процедурах их обработки предусмотрено применение насыщающих ограничений сверху и снизу.

На рис. 5 приведены кривые отклика FIS-блоков формирования переменных u_p , u_I , u_D нечеткого регулятора. Представленные данные отражают общее свойство FIS-блоков в системах регулирования: они осуществляют нелинейное преобразование входных сигналов в выходные и с этой точки зрения эквивалентны обычным нелинейным статическим блокам. Этот факт как раз и иллюстрирует рис. 5: видно, что кривые откликов построенных FIS-

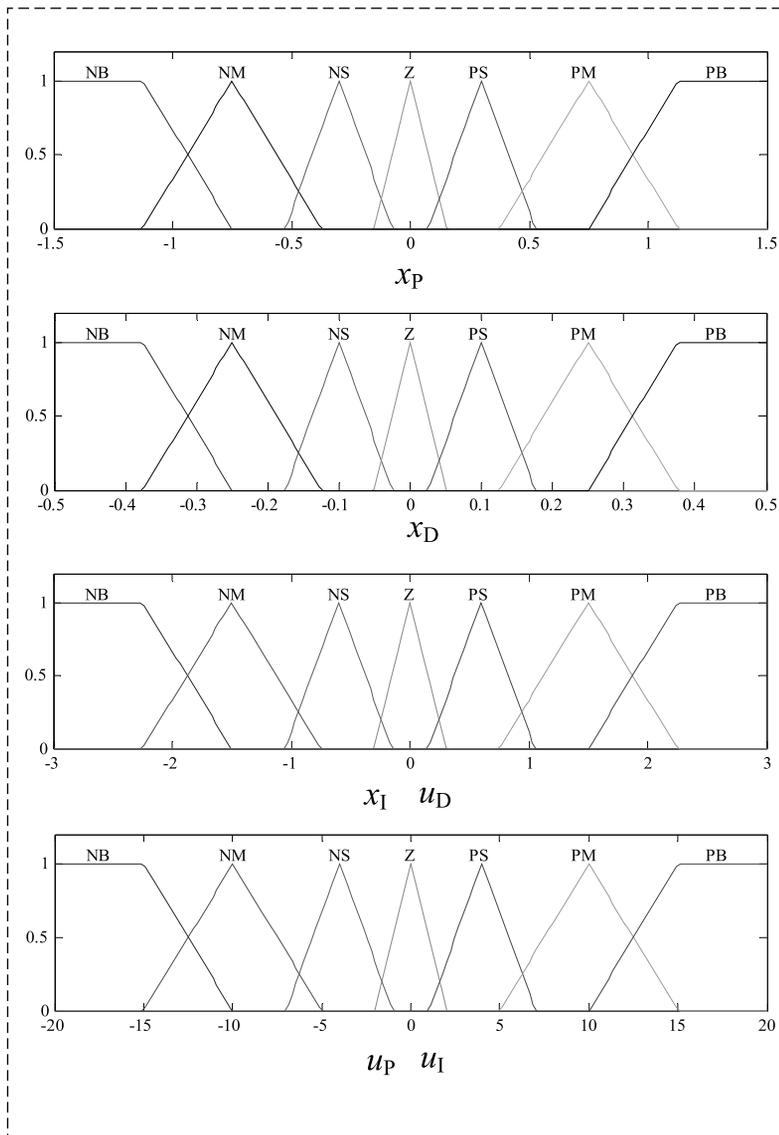


Рис. 4. Функции принадлежности лингвистических термов переменных x_p , x_I , x_D , u_p , u_I , u_D
 Fig. 4. Membership functions of linguistic terms of variables x_p , x_I , x_D , u_p , u_I , u_D

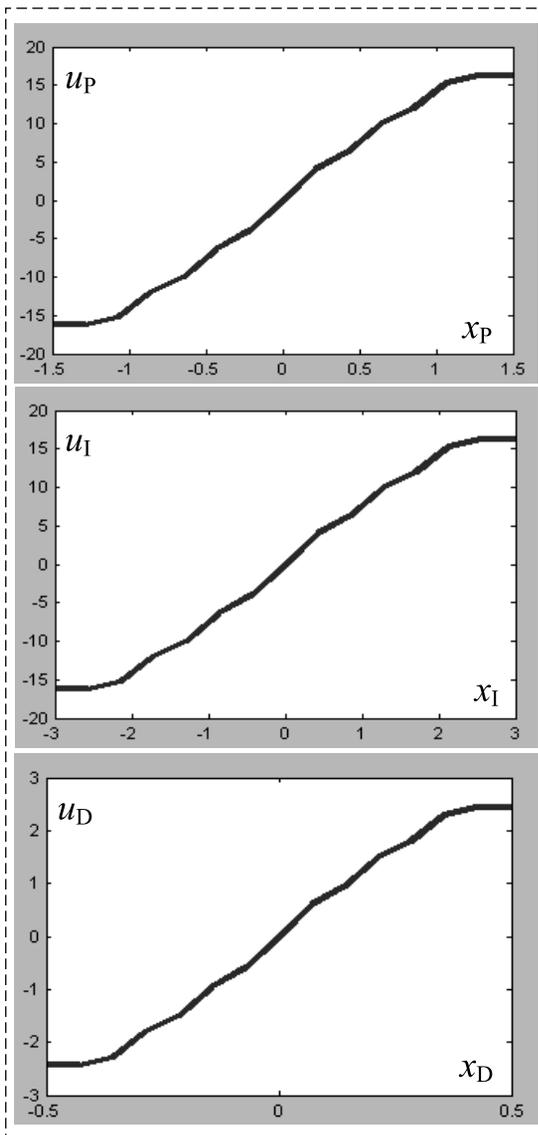


Рис. 5. Кривые отклика блоков формирования переменных x_p , x_I , x_D , u_p , u_I , u_D нечеткого регулятора
 Fig. 5. Curves of response units x_p , x_I , x_D , u_p , u_I , u_D variables of a fuzzy controller

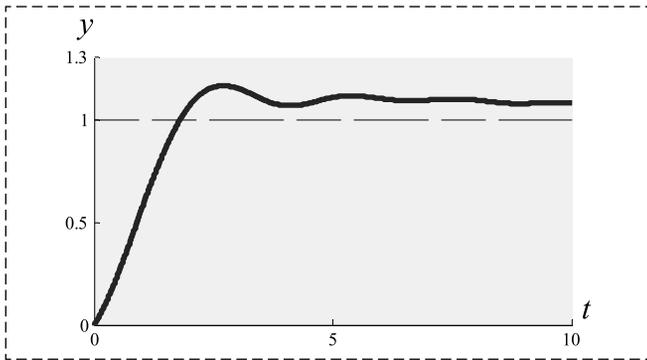


Рис. 6. Процесс нечеткого ПИД регулирования
Fig. 6. The process of fuzzy PID regulation

блоков близки по форме к так называемым линейным характеристикам с насыщением.

Моделирование нечеткого регулятора в среде MATLAB. Моделирование процессов нечеткого регулирования проводилось в среде MATLAB. Для этой цели использовались средства специального пакета расширения Fuzzy Logic Toolbox [11]. На рис. 6 показан переходный процесс отработки единичной уставки в синтезированной системе нечеткого регулирования. Видно, что здесь качество регулирования ниже, чем у процесса четкого регулирования, отображенного на рис. 2. В частности, у САР отсутствует свойство астатизма.

Заключение

Проведенный авторами анализ решений задач регулирования на базе нечеткой логики не выявил каких-либо их реальных преимуществ по сравнению с известными классическими решениями. Подытоживая выполненные исследования, выделим ряд проблемных аспектов методологии нечеткого регулирования.

1. Алгоритмы нечеткого регулирования существенно сложнее традиционных четких алгоритмов регулирования.

2. Тезис о преимуществах нечетких регуляторов представляется сомнительным, поскольку каждый такой регулятор возможно заменить более эффективным и структурно менее сложным четким регулятором.

3. Спорным является тезис о том, что на основе нечеткого подхода удастся синтезировать работоспособные САР без априорных знаний и предпроектного обследования динамических свойств объектов регулирования.

4. Нечеткий подход является сугубо эмпирическим и не позволяет на теоретическом уровне решать вопросы устойчивости, динамического качества и робастности синтезируемых САР.

5. Алгоритмы нечеткого регулирования не применимы к сложным динамическим объектам. В частности, это касается многосвязных объектов регулирования и объектов с запаздыванием.

6. Методология нечеткого регулирования не позволяет решать важные для инженерной практики вопросы оптимизации процессов регулирования.

Список литературы

1. Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems: Selected Papers by Lotfi A Zadeh (Advances in Fuzzy Systems — Applications and Theory: Vol. 6). Klir G. J. and Yuan B. ed. New York: World Scientific Pres, 1996. 840 p.
2. Асаи К., Вагада Д., Иваи С. и др. Прикладные нечеткие системы. Под ред Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. М.: Мир, 1993. 368 с.
3. Ross T. J. Fuzzy Logic with Engineering Applications, Hoboken, NJ: Wiley, 2016. 580 p.
4. Passino K. M., Yurkovich S. Fuzzy Control. Addison Wesley Longman, Menio Park, CA, 1998. 522 p.
5. Деменков Н. П. Нечеткое управление в технических системах. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. 200 с.
6. Michels K., Klawonn F., Kruse R., Nürnberger A. Fuzzy Control: Fundamentals, Stability and Design of Fuzzy Controllers. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2006. 410 p.
7. Бураков М. В. Нечеткие регуляторы. СПб.: Изд-во ГУАП, 2010. 236 с.
8. Гостев В. И. Проектирование нечетких логических регуляторов для систем автоматического управления. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 416 с.
9. Усков А. А. Системы с нечеткими моделями объектов управления. Смоленск: Смоленский филиал "РУК", 2013. 153 с.
10. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. 798 с.
11. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 736 с.
12. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 288 с.
13. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М.: Горячая линия-Телеком, 2009. 608 с.
14. Astrom K. J., Hagglund T. Advanced PID control. ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society), 2006. 460 p.
15. Панько М. А., Аракелян Э. К. Особенности нечетких алгоритмов регулирования в сравнении с классическими // Теплоэнергетика. 2001. № 10. С. 39–42.
16. Шанцева И. П. Фаззи-регулятор температуры электрических печей сопротивления // Вестник МЭИ. 2008. № 3. С. 51–56.
17. Мишта П. В., Бызов П. Г., Васильева Е. В. Нечеткая логика — современный путь развития теории управления // Известия ВолгГТУ. 2010. № 1. С. 139–142.
18. Бураков М. В., Коновалов А. С. Синтез нечетких логических регуляторов // Информационно-управляющие системы. 2011. № 1. С. 22–27.
19. Антипин А. Ф. О повышении быстродействия систем интеллектуального управления на базе нечеткой логики //

Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2013. № 5. С. 22–26.

20. Вильданов Р. Г., Бикметов А. Г., Самошкин А. И. Моделирование автоматической системы регулирования с fuzzy-регулятором // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. С. 140–146.

21. Демидова Г. Л., Кузин А. Ю., Лукичев Д. В. Особенности применения нечетких регуляторов на примере управления скоростью вращения электродвигателя постоянного тока // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16, № 5. С. 872–878.

22. Волобуев М. Ф., Замыслов М. А., Мальцев А. М., Михайленко С. Б. Математическая модель канала управления высотой полета летательного аппарата с элементами нечеткой логики и ее сравнение с классической моделью // Проблемы безопасности полетов. 2017. № 9. С. 36–48.

23. Куликова И. В. Влияние выбора алгоритмами нечеткого вывода на точность работы нечеткого регулятора // International Journal of Advanced Studies, 2017. Vol. 7, N. 4–3. P. 66–75.

24. Земцов А. Ф., Грязнов И. Е., Поступаева С. Г. Сравнительный анализ и исследование работы классического ПИД-регулятора с "нечеткими" его разновидностями // Известия ВолгГТУ. 2018. № 2. С. 63–66.

25. Ротаев В. Я. О фазы-ПИД-регуляторах // Теплоэнергетика. 1999. № 8. С. 32–36.

26. Ротаев В. Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов. М.: Изд. Дом МЭИ, 2008. 396 с.

27. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. О мнимых превосходствах алгоритмов нечеткого регулирования // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XIII Междунар. конф. Самара: Самарский НЦ РАН, 2011. С. 104–109.

28. Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. К вопросу построения нечетких ПИД-регуляторов // Мехатроника, автоматика и робототехника. 2018. № 2. С. 112–116.

29. Mamdani E. H. Application of Fuzzy Algorithm for Simple Dynamic Plant // Proc. IEEE. 1974. Vol. 121, N. 12. P. 1585–1588.

Sertain Problematic Aspects of Fuzzy PID Regulation

A. B. Filimonov, filimon_ab@mail.ru,

MIREA — Russian Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation

N. B. Filimonov, nbfilimonov@mail.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation

Corresponding author: Filimonov Nikolay B., Dr. Sci. Tech., Professor,
Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russian Federation,
e-mail: nbfilimonov@mail.ru

Accepted on August, 18, 2018

Abstract

In recent years in view of the fact that the interest in the technologies of artificial intelligence in control systems by technical objects and technological processes are aroused, that fuzzy controllers find use more often. The given regulators carry out the process of the development of controlling actions on the basis of fuzzy logic, the application of which provides the design of control systems capable of functioning in conditions of incompleteness and fuzziness of knowledge about the dynamics of the control object. Fuzzy regulators have opened a new direction in the area of automatic control and according to many experts have a promising future. The given paper analyzes the dynamic characteristics and algorithmic singularities of fuzzy PID-regulation systems, compares the quality of clear and fuzzy regulation. The conducted analysis allows to state the absence of any real advantages of fuzzy regulators in comparison with classic clear regulators. Moreover, it is possible to distinguish a number of problematic aspects of fuzzy regulation methodology, important for practical automation:

- fuzzy control algorithms are much more complex than traditional clear regulation algorithms;
- the thesis about the advantages of fuzzy regulators seems to be reasonable, since each such regulator can be replaced by a more efficient and structurally less complex clear regulator;
- the thesis that on the basis of fuzzy approach it is possible to synthesize working systems of regulation without a priori knowledge and pre-project inspection of dynamic properties of objects of regulation is disputable.
- fuzzy approach is purely empirical and does not allow to solve the problems of stability, dynamic quality and robustness of the synthesized regulation systems at the theoretical level;
- fuzzy control algorithms are not applicable to complex dynamic objects. In particular, it concerns multi-connected objects of regulation and objects with delay;
- the methodology of fuzzy regulation does not allow to solve the important issues of optimization of regulation processes for engineering practice.

Keywords: fuzzy logic, PID-regulators, algorithm of fuzzy inference of Mamdani, analysis of control processes, efficiency of regulation algorithms

Acknowledgements: This article was supported by grant of the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 16-08-00313-a).

For citation:

Filimonov A. B., Filimonov N. B. Sertain Problematic Aspects of Fuzzy PID Regulation, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 12, pp. 762–769.

DOI: 10.17587/mau.19.762-769

References

1. **Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems:** Selected Papers by Lotfi A Zadeh (Advances in Fuzzy Systems — Applications and Theory: vol. 6), Klir G. J. and Yuan B. ed., New York, World Scientific Pres, 1996.
2. Asai K., Vatada D., Ivai S. i dr. *Prikladnye nechetkie sistemy* (Applied fuzzy systems), T. Tehrano, K. Asai, M. Sugehno ed., Moscow, Mir, 1993 (in Russian).

3. **Ross T. J.** Fuzzy Logic with Engineering Applications, Hoboken, NJ, Wiley, 2016.
4. **Passino K. M., Yurkovich S.** Fuzzy Control, Addison Wesley Longman, Menlo Park, CA, 1998.
5. **Demenkov N. P.** *Nechetkoe upravlenie v tekhnicheskikh sistemah* (Fuzzy control in technical systems), Moscow, Publishing house of MG TU im. N. E. H. Bauman, 2005 (in Russian).
6. **Michels K., Klawonn F., Kruse R., Nürnbergger A.** Fuzzy Control: Fundamentals, Stability and Design of Fuzzy Controllers, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2006.
7. **Burakov M. V.** *Nechetkie regulatory* (Fuzzy regulators), SPb., Publishing house of GUAP, 2010 (in Russian).
8. **Gostev V. I.** *Proektirovanie nechetkih logicheskikh regulyatorov dlya sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Design of fuzzy logic regulators for automatic control systems), SPb., BHV-Peterburg, 2011 (in Russian).
9. **Uskov A. A.** *Sistemy s nechetkimi modelyami ob'ektov upravleniya* (Systems with fuzzy models of control objects), Smolensk, Smolenskij filial "RUK", 2013 (in Russian).
10. **Pegat A.** *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* (Fuzzy simulation and control), Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2013.
11. **Leonenkov A. V.** *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH* (Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH), SPb., BHV-Peterburg, 2003 (in Russian).
12. **Shtovba S. D.** *Proektirovanie nechetkih sistem sredstvami MATLAB* (Design of fuzzy systems by means of MATLAB), Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2007 (in Russian).
13. **Denisenko V. V.** *Kompyuternoe upravlenie tekhnologicheskim processom, ehksperimentom, oborudovaniem* (Computer control by technological process, experiment, equipment), Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2009 (in Russian).
14. **Astrom K. J., Hagglund T.** Advanced PID control / ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society), 2006.
15. **Pan'ko M. A., Arakelyan Eh. K.** *Osobennosti nechetkih algoritmov regulirovaniya v sravnenii s klassicheskimi* (Peculiarities of fuzzy control algorithms in comparison with classical ones), *Teploenergetika*, 2001, no. 10, pp. 39–42 (in Russian).
16. **Shanceva I. P.** *Fazzi-regulyator temperatury ehlektricheskikh pechej soprotivleniya* (Fuzzy-regulator of temperature of electric furnace resistance), *Vestnik MEHI*, 2008, no. 3, pp. 51–56 (in Russian).
17. **Mishta P. V., Byzov P. G., Vasil'eva E. V.** *Nechetkaya logika — sovremenniy put' razvitiya teorii upravleniya* (Fuzzy logic — is modern way of development of control theory), *Izvestiya VolgGTU*, 2010, no. 1, pp. 139–142 (in Russian).
18. **Burakov M. V., Kononov A. S.** *Sintez nechetkih logicheskikh regulyatorov* (Synthesis of fuzzy logic regulators), *Informacionno-Upravlyayushchie Sistemy*, 2011, no. 1, pp. 22–27 (in Russian).
19. **Antipin A. F.** *O povyshenii bystrodeystviya sistem intellektual'nogo upravleniya na baze nechetkoj logiki* (Concerning improving speed of intelligent control systems based on fuzzy logic), *Avtomatizatsiya, Telemekhanizatsiya i Svyaz' v Neftyanoy Promyshlennosti*, 2013, no. 5, pp. 22–26 (in Russian).
20. **Vil'danov R. G., Bikmetov A. G., Samoshkin A. I.** *Modelirovanie avtomaticheskoy sistemy regulirovaniya s fuzzy-regulyatorom* (Simulation of automatic regulation system with fuzzy controller), *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*, 2014, no. 4, pp. 140–146 (in Russian).
21. **Demidova G. L., Kuzin A. Yu., Lukichev D. V.** *Osobennosti primeneniya nechetkih regulyatorov na primere upravleniya skorost'yu vrashcheniya ehlektroprivodnogo toka* (Features of application of fuzzy regulators on the example of DC motor speed control), *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Informacionnykh Tekhnologiy, Mekhaniki i Optiki*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 872–878 (in Russian).
22. **Volobuev M. F., Zamyslov M. A., Mal'cev A. M., Mihajlenko S. B.** *Matematicheskaya model' kanala upravleniya vysotoj poleta letatel'nogo apparata s ehlementami nechetkoj logiki i ee sravnenie s klassicheskoy model'yu* (Mathematical model of the flight altitude control channel of the aircraft with fuzzy logic elements and its comparison with the classical model), *Problemy bezopasnosti poletov*, 2017, no. 9, pp. 36–48 (in Russian).
23. **Kulikova I. V.** *Vliyanie vybora algoritmov nechetkogo vyvoda na tochnost' raboty nechetkogo regulyatora* (Influence of selection of fuzzy inference algorithms on the accuracy of the fuzzy controller), *International Journal of Advanced Studies*, 2017, vol. 7, no. 4–3, pp. 66–75 (in Russian).
24. **Zemcov A. F., Gryaznov I. E., Postupaeva S. G.** *Sravnitel'nyy analiz i issledovanie raboty klassicheskogo PID-regulyatora s "nechetkimi" ego raznovidnostyami* (Comparative analysis and study of the classical PID controller with its "fuzzy" varieties), *Izvestiya VolgGTU*, 2018, no. 2, pp. 63–66 (in Russian).
25. **Rotach V. Ya.** *O fazi-PID-regulyatorah* (About phase-PID controllers), *Teploenergetika*, 1999, no. 8, pp. 32–36 (in Russian).
26. **Rotach V. Ya.** *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* (Theory of automatic control), Moscow, Publishing house of MEHI, 2008 (in Russian).
27. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *O mnimyykh prevoskhodstvakh algoritmov nechetkogo regulirovaniya* (On the imaginary superiority of fuzzy control algorithms), *Problemy Upravleniya i Modelirovaniya v Slozhnykh Sistemah: Trudy VIII Mezhdunar. konf.*, Samara, Samarskij NC RAN, 2011, pp. 104–109 (in Russian).
28. **Filimonov A. B., Filimonov N. B.** *K voprosu postroeniya nechetkih PID-regulyatorov* (To the question of the construction of fuzzy PID controllers), *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*, 2018, no. 2, pp. 112–116 (in Russian).
29. **Mamdani E. H.** Application of Fuzzy Algorithm for Simple Dynamic Plant, *Proc. IEEE*, 1974, vol. 121, no. 12, pp. 1585–1588.