



УДК 681.5

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ НА ПРИМЕРЕ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Г.Л. Демидова^а, А.Ю. Кузин^а, Д.В. Лукичев^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
Адрес для переписки: lukichev@ets.ifmo.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 03.06.16, принята к печати 29.08.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-872-878

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: 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. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-872-878

Аннотация

Предпосылкой к использованию методов интеллектуального управления, в том числе алгоритмов нечеткой (фаззи-) логики, служит происходящее во всех отраслях промышленности усложнение технических систем, параметры которых в процессе эксплуатации могут изменяться в довольно широких пределах. В работе приводится сравнительный анализ основных типов нечетких регуляторов прямого действия на примере системы управления скоростью вращения двигателя в электроприводе постоянного тока. Показаны характерные особенности построения данных типов нечетких регуляторов, с помощью имитационного моделирования приводится их сравнение с традиционным ПИ-регулятором, в том числе и в условиях неопределенности, выраженной в изменении приведенного момента инерции вала двигателя. В результате делается вывод о целесообразности использования нечеткого регулятора ПИД-типа. Приведенные в работе характерные особенности нечетких регуляторов могут быть обобщены как на более сложные системы управления электроприводами, так и на другие нелинейные системы, где требуется поддержание какого-либо параметра в заданном диапазоне.

Ключевые слова

двигатель постоянного тока, ПИД-регулятор, нечеткая логика, нечеткий регулятор, робастность

Благодарности

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01).

APPLICATION FEATURES OF FUZZY CONTROLLERS ON EXAMPLE OF DC MOTOR SPEED CONTROL

G.L. Demidova^а, A.Yu. Kuzin^а, D.V. Lukichev^а

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: lukichev@ets.ifmo.ru

Article info

Received 03.06.16, accepted 29.08.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-872-878

Article in Russian

For citation: Demidova G.L., Kuzin A.Yu., Lukichev D.V. Application features of fuzzy controllers on example of DC motor speed control. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 872–878. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-872-878

Abstract

A prerequisite for the use of intelligent control methods, including algorithms of fuzzy logic, is increasing complexity in all industries, especially when parameters of technical systems while in operation vary in wide range. The paper provides comparative analysis of the basic types of common fuzzy direct action controllers on the example of speed control system in the DC motor drive. Design features of these types of fuzzy controllers are shown. Their comparison with traditional PI controller is carried out through the use of simulation, including the conditions of uncertainty expressed in changing of equivalent moment of inertia of the motor shaft. As a result, the conclusion about the feasibility of fuzzy PID-type controller

application is made. The features of fuzzy controllers outlined in the paper can be summarized to more complex motor drive systems and to other non-linear systems that require the maintenance of any parameter within a given range.

Keywords

DC motor, PID controller, fuzzy logic, fuzzy controller, robustness

Acknowledgements

The work is partially financially supported by the Government of the Russian Federation (grant 074-U01).

Введение. Постановка задачи

Для реализации заданных показателей качества регулирования в различных отраслях промышленности с начала изобретения и по настоящее время наиболее часто используемыми остаются пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД)-регуляторы, преимущества которых широко известны [1]. Существует множество методик оптимальной настройки регуляторов, использующихся в различных технологических процессах [2, 3]. Однако при наличии сложных объектов, имеющих трудно формализуемый характер с множеством внутренних перекрестных связей, нелинейных элементов и звеньев запаздывания, параметры которых к тому же в процессе эксплуатации изменяются в широких пределах, традиционный метод ПИД-регулирования не может обеспечить приемлемое качество управления, поэтому актуальность приобретают различные адаптивные методы [4, 5]. В последнее время при решении таких задач используются методы интеллектуального управления, в частности, аппарат нечеткой логики, который преимущественно реализуется в виде различных типов регуляторов [6–15]. Однако в данных работах, как правило, используется один априорно заданный тип регулятора, и не приводится сравнение с другими типами нечетких регуляторов (НР). Также представляет интерес анализ работы нечетких систем управления при изменении параметров объекта регулирования. Таким образом, ставится задача на примере системы регулирования скоростью вращения двигателя постоянного тока провести синтез и рассмотреть работу основных типов НР прямого действия, выявить характерные особенности, а также сравнить их работу с традиционным пропорционально-интегральным (ПИ)-регулятором, в том числе и в условиях внешних и параметрических возмущений.

Математическое описание объекта управления

В качестве объекта регулирования используется двигатель постоянного тока с независимым возбуждением ДПУ240–1100-3-Д41-09. Известно, что математическая модель двигателя может быть описана уравнениями (1) обобщенного электромеханического преобразователя с линейной механической характеристикой [16]:

$$\begin{cases} (1 + T_{\alpha} p)M = \beta(\omega_0 - \omega), \\ M - M_c = Jp\omega, \end{cases} \quad (1)$$

где ω_0 – скорость холостого хода; ω – скорость вращения; M , M_c – соответственно электромагнитный момент и момент сопротивления на валу двигателя; $\beta = C_e C_m / R_{\alpha}$ – модуль статической жесткости механической характеристики, R_{α} – сопротивление якоря, T_{α} – электромагнитная постоянная, C_e , C_m – конструкторные постоянные по скорости и моменту; J – приведенный момент инерции к валу двигателя; p – число пар полюсов.

На основе уравнений (1) в пакете MATLAB\Simulink построена математическая модель электропривода с управлением скоростью вращения (рис. 1), которая содержит также блок усилителя мощности с коэффициентом пропорциональности $K_{\text{пр}}$ и инерционностью $T_{\text{пр}}$, которой можно пренебречь в силу значительной частоты переключения современных ключей, а также датчик скорости с коэффициентом передачи K_{ω} .

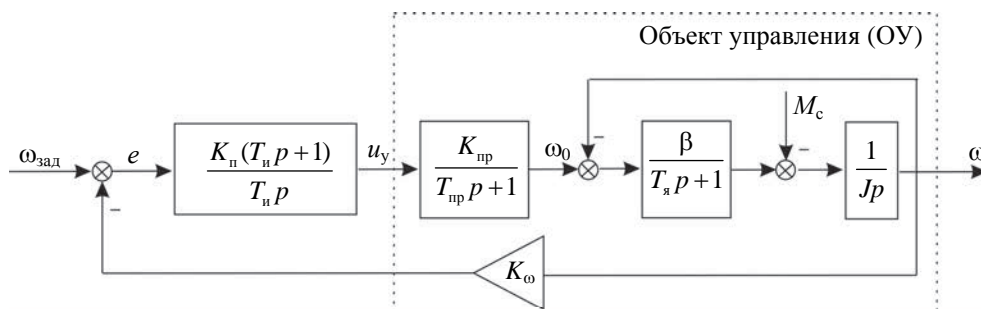


Рис. 1. Структурная схема электропривода с управлением скоростью

С учетом данной структуры коэффициенты ПИ-регулятора вычисляются из условия настройки системы на технический оптимум [16]:

$$T_n = T_a, \quad K_n = \frac{T_n J}{2T_n K_{np} K_{\omega} \beta}.$$

Основной результат

Под нечетким управлением понимается стратегия управления, основанная на эмпирически приобретенных знаниях («опыте эксперта») о функционировании объекта, при которой сложные отношения между входом и выходом регулируемого процесса представляются в лингвистической форме в виде некоторой совокупности нечетких инструкций (правил) (IF – THEN) [5, 6]. На рис. 2 представлена типовая структурная схема системы управления с НР.

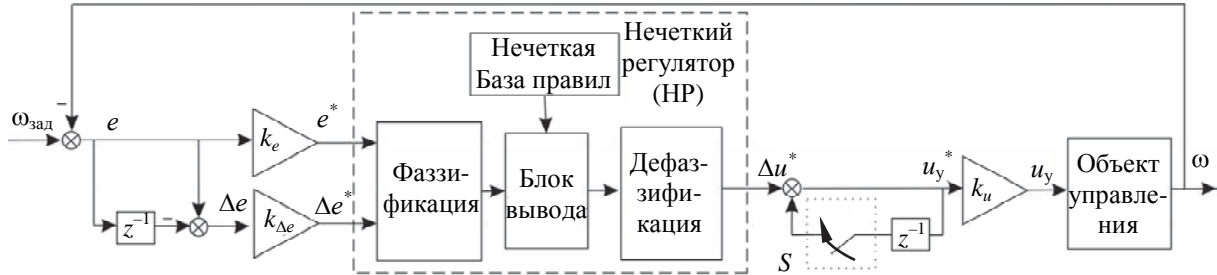


Рис. 2. Структурная схема системы управления с нечетким регулятором

Внутренняя типовая структура НР состоит из четырех главных блоков [5]: входной преобразователь, который реализует процесс перехода от точных величин к их нечеткой интерпретации (блок «фаззификация»); база правил нечеткой логики, которая содержит опытные данные о процессе управления; блок нечеткого логического вывода, который является ядром нечетких вычислений и моделирует процедуру принятия решения человеком, а также выходной преобразователь из нечетких множеств к единственному четкому значению выхода u_y , используемому в текущий момент времени для управления скоростью вращения двигателя (блок «дефаззификация»).

В работе рассматривается универсальная структура НР, на базе которой можно строить различные типы нечетких ПИД-подобных регуляторов прямого действия. Входными сигналами для НР являются ошибка $e = \omega_{зад} - \omega$ и ее производная (скорость изменения ошибки) de/dt . Поскольку НР чаще всего реализуется средствами микропроцессорной техники, то осуществляется переход к дискретной форме представления, при которой производная ошибки на входе НР заменяется приращением, а интеграл на выходе НР – суммой:

$$\Delta e = e(k) - e(k-1) = (1 - z^{-1})e(k),$$

$$u_y^*(k) = \frac{\Delta u^*}{(1 - z^{-1})},$$

где k – номер шага квантования по времени, z^{-1} – операция задержки сигналов на один такт. С помощью ключа S в представленной структуре осуществляется включение в алгоритм работы НР интегральной составляющей.

Помимо перехода к дискретной форме представления в цифровых системах требуется привести сигналы к диапазону $[-1, 1]$, для чего выполняется процедура нормализации входных сигналов и обратная процедура денормализации выходных сигналов. Коэффициенты нормализации для $e, \Delta e$ выбираются исходя из максимально возможных значений скорости и ускорения в системе $e = \omega_{max}, \Delta e = \epsilon_{max}$, так что нормализованные величины $e^*, \Delta e^* \in [-1, 1]$

$$k_e = 1 / (\max |\omega|), \quad k_{\Delta e} = 1 / (\max |\epsilon|).$$

Коэффициент денормализации выходной величины u_y выбирается из значения управления, при котором напряжение на усилителе будет максимальным:

$$k_u = \max |u_y|.$$

Величины максимальной скорости, ускорения и напряжения усилителя мощности определяются техническим заданием на разрабатываемую систему управления, а также аппаратными составляющими системы.

Алгоритм синтеза НР – нахождение оптимальных параметров описанных выше блоков для получения наилучшего качества регулирования [17], – может быть представлен блок-схемой, приведенной на

рис. 3, а. Для выявления особенностей различных структур НР для всех лингвистических переменных используются одни и те же треугольные функции принадлежности (рис. 3, б) с терминами BN – «большое отрицательное», N – «отрицательное», Z – «нулевое», P – «положительное», BP – «большое положительное», с единой базой правил, представленной на рис. 3, в, в табличной форме. Для определения нечеткого вывода u^* при процедуре дефаззификации используется метод «центра тяжести» [6].

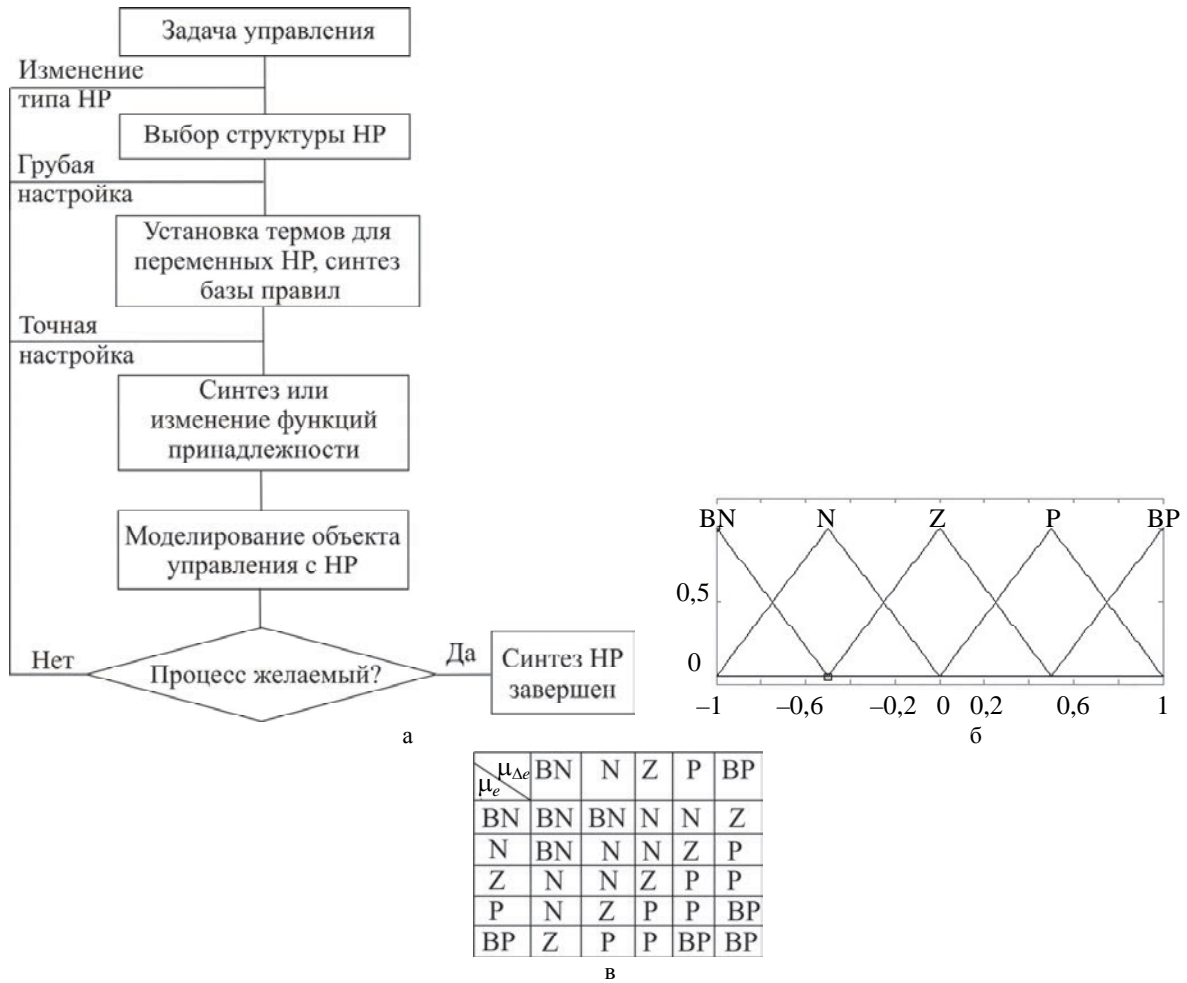


Рис. 3. Алгоритм синтеза нечетких регуляторов (а), используемые функции принадлежности нечетких регуляторов (б) и база нечетких правил (в)

На основе универсальной структуры НР (рис. 2) рассматриваются следующие типы НР: НР пропорционально-дифференциального (ПД)-типа (рис. 4, а), НР ПИ-типа, а также дополненный передаточной функцией ПИ-регулятора гибридный НР (рис. 5, а), НР ПИД-типа_1, составленный из НР ПД- и ПИ-типов (рис. 6, а), НР ПИД-типа_2 с упрощенной структурой (рис. 7, а). Временные диаграммы в системе управления скоростью вращения двигателя с данными типами регуляторов при отработке управляющего сигнала и последующей подачей возмущения в виде скачка момента нагрузки приводятся на рис. 4–7, б.

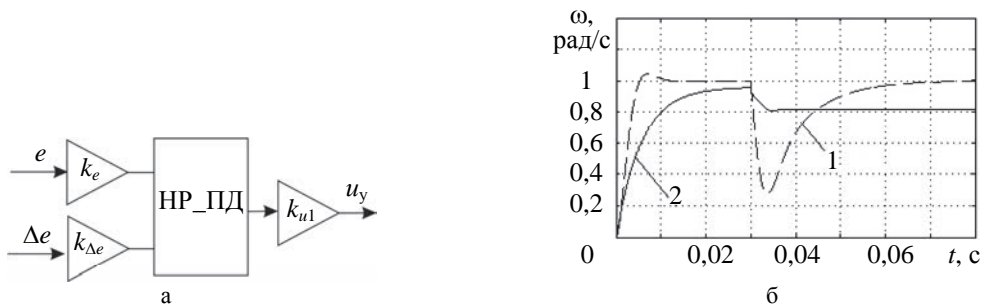


Рис. 4. Нечеткий регулятор ПД-типа (а) и временные процессы в системе с ПИ-регулятором (1), нечетким регулятором ПД-типа (2) (б)

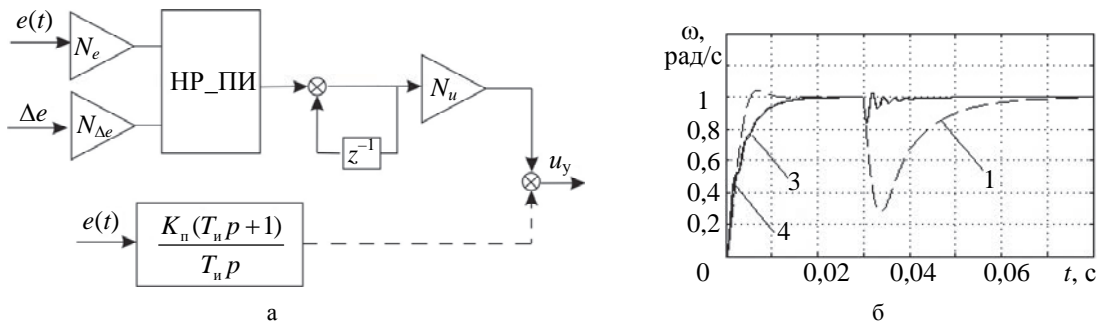


Рис. 5. Нечеткий регулятор ПИ-типа и гибридный регулятор с нечетким регулятором ПИ-типа (а), а также временные процессы в системе с ПИ-регулятором (1), нечетким регулятором ПИ-типа (3) и гибридным нечетким регулятором (4) (б)

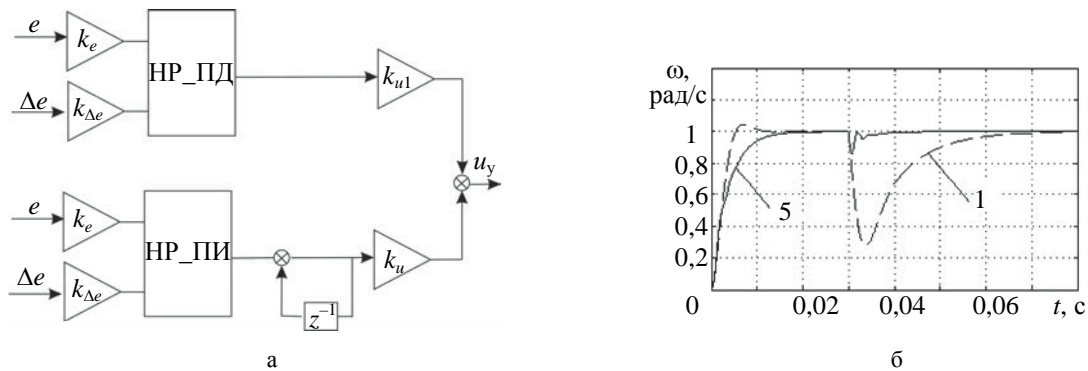


Рис. 6. Нечеткий регулятор ПИД-типа_1, составленный из нечеткого регулятора ПД- и ПИ-типов (а), а также временные процессы в системе с ПИ-регулятором (1) и нечетким регулятором ПИД-типа_1 (5) (б)

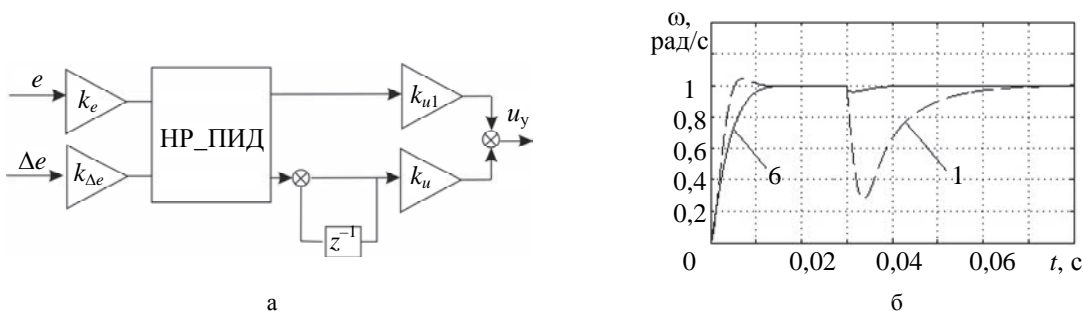


Рис. 7. Упрощенное описание нечеткого регулятора ПИД-типа_2 (а), а также временные процессы в системе с ПИ-регулятором (1) и нечетким регулятором ПИД-типа_2 (6) (б)

Анализ графиков электромеханических переходных процессов (рис. 4–7, б) показал, что система с традиционным ПИ-регулятором обладает показателями технического оптимума. НР ПД-типа не обладает астатизмом, и при набросе момента нагрузки в системе имеет место установившаяся ошибка. Графики процессов в системе с НР ПИ-типа и гибридным НР ПИ-типа практически совпадают и за счет отсутствия Д-составляющей обладают колебательным характером. НР ПИД-типа_1, составленный из НР ПД- и ПИ-типов, демпфирует колебания, но хуже, чем при использовании НР ПИД-типа_2.

Для анализа поведения данных систем при параметрическом возмущении рассмотрим изменение момента инерции исполнительного механизма. На рис. 8, а, приводятся переходные процессы при увеличенном в 5 раз моменте инерции. Поскольку коэффициенты традиционного ПИ-регулятора рассчитывались на определенное значение момента инерции, графики переходного процесса имеют затянутый вид и выходят в заданное значение только спустя большой интервал времени (здесь выводится временной интервал меньше этого значения). На рис. 8, б, приводятся переходные процессы при уменьшенном в 5 раз моменте инерции. Представленные на графиках рис. 8 процессы описывают: 1 – традиционный ПД-регулятор, 2 – НР ПД-типа, 3 – НР ПИ-типа, 4 – гибридный НР, 5 – НР ПИД-типа_1, 6 – НР ПИД-типа_2.

Как и предполагалось, все рассматриваемые структуры НР обладают робастностью и нечувствительностью к изменяемым параметрам объекта управления. При рассмотренных возмущениях лучшими динамическими характеристиками обладает НР упрощенного ПИД-типа_2.

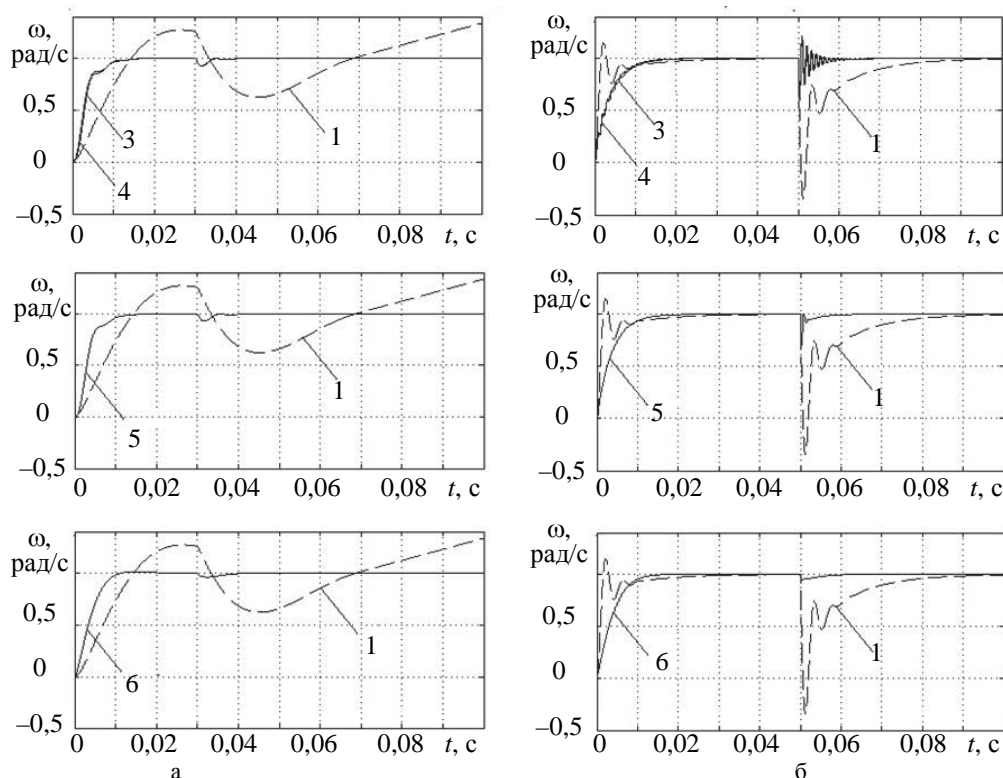


Рис. 8. Временные процессы в системах с различными типами регуляторов при увеличенном моменте инерции J в 5 раз (а) и уменьшенном моменте инерции J в 5 раз (б)

Заключение

В работе приведен сравнительный анализ основных типов нечетких регуляторов прямого действия на примере системы управления скоростью вращения двигателя в электроприводе постоянного тока. Наиболее простой с точки зрения технической реализации традиционный ПИД-регулятор может использоваться в системах, где к качеству управления не предъявляются высокие требования и не изменяются параметры управляемых процессов. Нечеткое управление показывает лучшие результаты по сравнению с традиционным ПИД-регулированием особенно в случаях параметрического возмущения, т.е. такие системы обладают робастностью и устойчивостью. Была проанализирована работа различных структур нечетких регуляторов, наилучшим из которых признан нечеткий регулятор ПИД-типа_2.

Литература

1. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005. V. 13. N 4. P. 559–576. doi: 10.1109/TCST.2005.847331
2. Quevedo J., Escobet T. Digital control: past, present and future of PID control // *Proc. IFAC Workshop*. Terrassa, Spain, 2000.
3. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers // *Trans. ASME*, 1942. V. 64. P. 759–768.
4. Демидова Г.Л., Ловлин С.Ю., Цветкова М.Х. Синтез следящего электропривода азимутальной оси телескопа с эталонной моделью в контуре положения // *Вестник ИГЭУ*, 2011. № 2. С. 77–81.
5. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н.Д. Егупова. 2-е изд. М.: МГТУ, 2002. 744 с.
6. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. Киев: Радиоаматор, 2008. 972 с.
7. Sheng O., Haishan L., Guoying L., Guohui Z., Xing Z., Qingzhen W. A fuzzy PI speed controller based on feedback compensation strategy for PMSM // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2015. V. 6. N 5. P. 49–54.
8. Амосов О.С., Амосова Л.Н., Иванов С.Н. Синтез оптимальных систем управления электромеханическим теплогенерирующим комплексом с использованием нечетких

References

1. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, vol. 13, no. 4, pp. 559–576. doi: 10.1109/TCST.2005.847331
2. Quevedo J., Escobet T. Digital control: past, present and future of PID control. *Proc. IFAC Workshop*. Terrassa, Spain, 2000.
3. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers. *Trans. ASME*, 1942, vol. 64, pp. 759–768.
4. Demidova G.L., Lovlin S.Yu., Tsvetkova M.Kh. Synthesis of follow-up electric drive of telescope's azimuth axis with reference model in position contour. *Vestnik ISPU*, 2011, no. 2, pp. 77–81. (In Russian)
5. *Metody Robastnogo, Neuro-Nechetkogo i Adaptivnogo Upravleniya* [Methods of Robust, Neuro-Fuzzy and Adaptive Control]. Ed. N.D. Egupov. 2nd ed. Moscow, MGTU Publ., 2002, 744 p.
6. Gostev V.I. *Fuzzy Controllers in Automatic Control Systems*. Kiev, Radioamator Publ., 2008, 972 p. (In Russian)
7. Sheng O., Haishan L., Guoying L., Guohui Z., Xing Z., Qingzhen W. A fuzzy PI speed controller based on feedback compensation strategy for PMSM. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2015, vol. 6, no. 5, pp. 49–54.
8. Amosov O.S., Amosova L.N., Ivanov S.N. The synthesis of the optimum control systems for electromechanical heat

- систем // Информатика и системы управления. 2009. № 1(19). С. 73–83.
9. Хижняков Ю.Н., Южаков А.А. Нейро-нечеткий регулятор напряжения объекта управления // Известия вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 12. С. 51–56.
 10. Усольцев А.А., Смирнов Н.А. Нечеткий регулятор в системе управления следящим электроприводом с ограничением по скорости // Вестник ИГЭУ. 2011. № 3. С. 27–32.
 11. Лукичев Д.В., Демидова Г.Л. Нечеткая система управления позиционным следящим электроприводом опорно-поворотных устройств с жесткими осями // Вестник ИГЭУ. 2013. № 6. С. 60–64.
 12. Куприянич Д.В., Денисов К.М., Лукичев Д.В., Жданов И.Н. Аппаратная реализация алгоритмов нечеткой логики в структуре учебного лабораторного комплекса // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2006. № 33. С. 169–173.
 13. Derugo P., Szabat K. Implementation of the low computational cost fuzzy PID controller for two-mass drive system // Proc. 16th Int. Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC). Antalya, Turkey, 2014. P. 564–568. doi: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980554
 14. Kaminski M., Szabat K. Neuro-fuzzy state space controller for drive with elastic joint // Proc. 11th IEEE Int. Conf. on Power Electronics and Drive Systems. Sydney, Australia, 2015. P. 373–378. doi: 10.1109/PEDS.2015.7203559
 15. Lukichev D.V., Demidova G.L., Brock S. Fuzzy adaptive PID control for two-mass servo-drive system with elasticity and friction // Proc. 2nd IEEE Int. Conf. on Cybernetics (CYBCONF). Gdynia, Poland, 2015. P. 443–448. doi: 10.1109/CYBCONF.2015.7175975
 16. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
 17. Усков А.А. Системы с нечеткими моделями объектов управления. Смоленск, 2013. 153 с.
 - generating complexes with using fuzzy systems. *Information Science and Control Systems*, 2009, no. 1, pp. 73–83. (In Russian)
 9. Khizhnyakov Yu.N., Yuzhakov A.A. Neuro-fuzzy voltage controller for the object of management. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, vol. 554, no. 12, pp. 51–56.
 10. Usoltsev A.A., Smirnov N.A. Fuzzy controller in servo drive control system with speed limitation. *Vestnik ISPU*, 2011, no. 3, pp. 27–32.
 11. Lukichev D.V., Demidova G.L. Fuzzy control system of positioning servo drives of elastic coupling rotary supports. *Vestnik ISPU*, 2013, no. 6, pp. 60–64.
 12. Kupriyanchik D.V., Denisov K.M., Lukichev D.V., Zhdanov I.N. Hardware implementation of fuzzy logic in the structure of the educational laboratory complex. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2006, no. 33, pp. 169–173. (In Russian)
 13. Derugo P., Szabat K. Implementation of the low computational cost fuzzy PID controller for two-mass drive system. *Proc. 16th Int. Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, PEMC*. Antalya, Turkey, 2014, pp. 564–568. doi: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980554
 14. Kaminski M., Szabat K. Neuro-fuzzy state space controller for drive with elastic joint. *Proc. 11th IEEE Int. Conf. on Power Electronics and Drive Systems*. Sydney, Australia, 2015, pp. 373–378. doi: 10.1109/PEDS.2015.7203559
 15. Lukichev D.V., Demidova G.L., Brock S. Fuzzy adaptive PID control for two-mass servo-drive system with elasticity and friction. *Proc. 2nd IEEE Int. Conf. on Cybernetics, CYBCONF*. Gdynia, Poland, 2015, pp. 443–448. doi: 10.1109/CYBCONF.2015.7175975
 16. Klyuchev V.I. *Electric Drive Theory: Textbook*. 2nd ed. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2001, 704 p. (In Russian)
 17. Uskov A.A. *Sistemy s Nchetkimi Modelyami Ob"ektov Upravleniya* [Systems with Fuzzy Models of Controlled Objects]. Smolensk, 2013, 153 p.

Авторы

Демидова Галина Львовна – ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, demidova@ets.ifmo.ru

Кузин Алексей Юрьевич – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, cuzinaleksey@yandex.ru

Лукичев Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, lukichev@ets.ifmo.ru

Authors

Galina L. Demidova – assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, demidova@ets.ifmo.ru

Aleksey Yu. Kuzin – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, cuzinaleksey@yandex.ru

Dmitry V. Lukichev – PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, lukichev@ets.ifmo.ru