

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ И НЕЙРОНЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХМАССОВЫМ ОБЪЕКТОМ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ

Д. В. ЛУКИЧЕВ, А. Ю. КУЗИН, Г. Л. ДЕМИДОВА, С. Ю. ЛОВЛИН, И. Н. ЖДАНОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: cuzinaleksey@yandex.ru*

Представлен метод синтеза и анализа алгоритмов управления на базе нечеткой логики и нейронных сетей на примере двухмассовой электромеханической системы с нелинейным возмущением в виде момента сухого трения. Проанализировано поведение синтезируемых систем при действии ветрового момента, а также исследуется робастность систем, в которых параметрическим возмущением является изменение момента инерции исполнительного механизма. Анализ полученных результатов позволяет оценить целесообразность применения рассматриваемых алгоритмов.

Ключевые слова: *электропривод, нечеткая логика, ANFIS, нейронные сети, робастное управление, управление положением*

Введение. На сегодняшний день использование пропорционально-интегрально-дифференциальных (ПИД) регуляторов является универсальным методом управления техническими объектами как в промышленности, так и в бытовой сфере. Каскадные системы подчиненного регулирования с ПИД-алгоритмами активно применяются, в частности, в комплексах слежения с использованием оптических и радиотелескопов [1, 2]. Такие системы характеризуются широким диапазоном скоростей от единиц угловых секунд в секунду до единиц угловых градусов в секунду. Применение в этих системах линейных ПИД-алгоритмов при наличии таких внутренних и внешних возмущений, как момент сухого трения и ветровой момент приводит к возникновению так называемого „шагового режима“. В связи с этим возрастает актуальность различных адаптивных алгоритмов [3, 4], среди которых можно выделить системы на базе нечеткой логики и нейронных сетей [5, 6]. Функционирование различных типов нечетких регуляторов (НР) в системе управления двигателем постоянного тока исследуется в работе [7], где описывается работа НР в одноконтурной системе управления одномассовым объектом без учета различных нелинейных возмущающих воздействий. Известны отдельные исследования систем регулирования угловой скорости с использованием НР, однако следящие позиционные системы имеют свои, например указанные в работах [8, 9], особенности, что не позволяет полностью применить приведенные в этих работах рекомендации к системе управления объектом, исследуемым в настоящей статье. Здесь предлагается использовать свойства нейронных сетей для синтеза оптимизированной нейронечеткой сети ANFIS (Artificial Neural Fuzzy Inference System), применение которой эффективно для повышения стабильности работы системы управления.

Объект управления. Объектом управления в данном исследовании служит электромеханический двухмассовый лабораторный стенд, имитирующий работу квантово-оптического комплекса (телескопа). Первая масса (момент инерции J_1) представлена синхронной машиной с постоянными магнитами (СМПМ), а также инкрементальным датчиком. Вторая масса (момент инерции J_2) представлена маховиком из стальных колец. Двигатель и маховик соединены упругой конструкцией с коэффициентом жесткости c_{12} . Математическая модель механической части объекта описывается системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} J_1 s \omega_1 &= M_0 - M_{12} - M_{f1}; \\ J_2 s \omega_2 &= M_{12} - M_{f2}; \\ M_{12} &= c_{12} (\alpha_1 - \alpha_2) + k_d (\omega_1 - \omega_2); \\ \alpha_1 &= \omega_1 / s; \\ \alpha_2 &= \omega_2 / s, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где M_0 — момент, развиваемый двигателем; M_{12} — момент упругой связи, включающий демпфирующий момент с коэффициентом k_d ; M_{f1}, M_{f2} — моменты сухого трения масс; ω_1, α_1 — угловая скорость и угол поворота ротора СМПМ; ω_2, α_2 — угловая скорость и угол поворота маховика [10].

Сопротивление, действующее на первую массу (момент сухого трения), может привести к возникновению колебаний при вращении на низких скоростях. Кроме того, в системах управления осью вращения телескопа сильное влияние на точность наведения оказывает ветровой момент, который имеет случайный характер. Несмотря на это, наиболее надежными и изученными считаются ПИД-алгоритмы, которые чаще всего и применяются на практике. Система подчиненного регулирования положением оси двухмассового электромеханического стенда приведена на рис. 1 (здесь K_α, K_ω и K_i — коэффициенты датчиков углового положения, скорости и тока). На схеме отображены действия момента сухого трения и ветрового момента M_w . Параметры СМПМ и нагрузки для настройки системы управления приведены ниже.

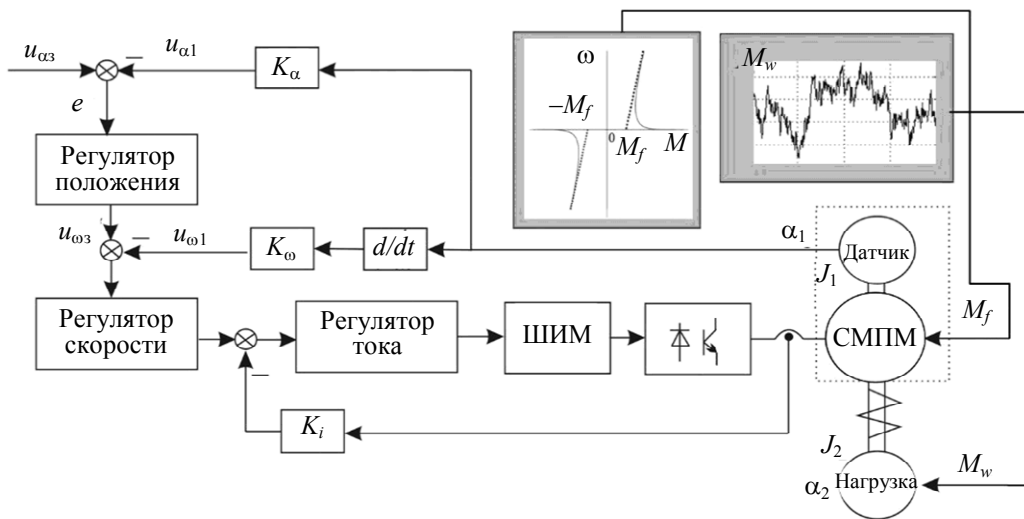


Рис. 1

Число пар полюсов p	24
Сопротивление статора R_s , Ом	1,2
Электромагнитная постоянная времени T_e , мс	8
Постоянная противоЭДС K_e , В·с/рад	3,58
Постоянная по моменту K_m , Н·м/А	5,09
Коэффициент жесткости c_{12} , Н·м/рад	$4,19 \cdot 10^5$
Момент инерции первой массы J_1 , кг·м ²	0,83
Момент инерции второй массы J_2 , кг·м ²	9,23

ПИ-регулятор. Настройка коэффициентов регуляторов внутренних контуров системы управления многомассовым объектом проводится с помощью одномассовой модели объекта регулирования. Крайне важной в системах с упругими связями является настройка контура

регулирования скорости. В исследуемой системе регулятор скорости с помощью интегрального и пропорционального звеньев настраивается на технический оптимум. Постоянная времени скоростного контура определяется исходя из полосы пропускания, соответствующей частоте Ω_{R0} :

$$T_{\mu} = \frac{1}{2\Omega_{R0}}, \quad (2)$$

где $\Omega_{R0} < \frac{\Omega_R}{\sqrt[4]{\gamma^3}}$, $\Omega_R = \sqrt{\frac{c_{12}(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}}$ — частота механического резонанса двухмассовой нагрузки, $\gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_1}$ — коэффициент соотношения масс.

Передаточная функция замкнутого контура скорости, настроенного на технический оптимум, определяется как

$$W(s) = \frac{1/K_{\omega}}{2T_{\mu}^2 s^2 + 2T_{\mu} s + 1}. \quad (3)$$

С учетом выражения (3) контур регулирования углового положения настраивается с использованием ПИ-регулятора на симметричный оптимум.

Регулятор с нечеткой логикой. Структура базового блока нечеткой логики, на котором строится нечеткий регулятор, представлена на рис. 2. Согласно приведенной схеме процесс работы такого блока можно разделить на 3 этапа:

- фаззификация — процесс преобразования точных величин к их нечеткой интерпретации;
- нечеткий вывод — процесс принятия решения о значении выходного сигнала в соответствии с базой правил;
- дефаззификация — процесс обратного преобразования сигнала из нечеткого вида к его единственному выходному значению.

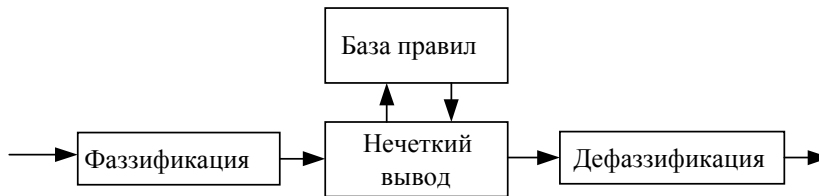


Рис. 2

В данной статье рассматривается структура нечеткого регулятора, входные данные которого — текущая ошибка e исследуемого параметра, а также скорость изменения этой ошибки de (рис. 3). На входе регулятора обязательно устанавливается блок насыщения, так как блок нечеткой логики работает с конечными величинами, и превышение заданного диапазона может приводить к непредсказуемой реакции регулятора.

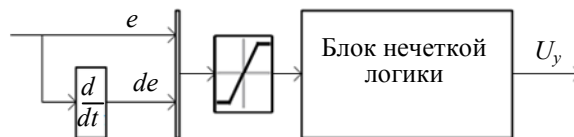


Рис. 3

База правил синтезированного НР представлена в табл. 1 зависимостью выходного сигнала U_y от величин e и de , где степени принадлежности входного параметра к некоторому множеству значений обозначены следующим образом: NB — отрицательная большая, NM —

относительная средняя, NS — отрицательная малая, Z — нулевая, PS — положительная малая, PM — положительная средняя, PB — положительная большая.

Таблица 1

e	de						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z	Z
NM	NB	NB	NM	NS	Z	Z	PS
NS	NB	NM	NS	Z	Z	PS	PM
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	NS	Z	Z	PS	PM	PB
PM	NS	Z	Z	PS	PM	PB	PB
PB	Z	Z	PS	PM	PB	PB	PB

Нейронечеткий регулятор (НР). Нейронные сети являются мощным инструментом аппроксимации и адаптации, что делает их незаменимыми в случаях, когда объект управления имеет значительные нелинейности [11—14]. Рассмотрим метод оптимизации нечеткого регулятора с помощью нейронных сетей.

В качестве данных для обучения нейронной сети предлагается использовать синусоидальный сигнал с переменной частотой $y(t) = \sin(k\omega t)$. Пример такого сигнала показан на рис. 4 (сплошная линия — ошибка, штриховая линия — производная ошибки), а процесс получения обучающих данных для ННР представлен на рис. 5.

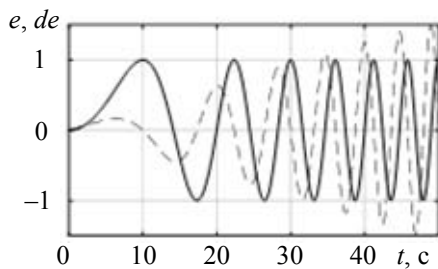


Рис. 4

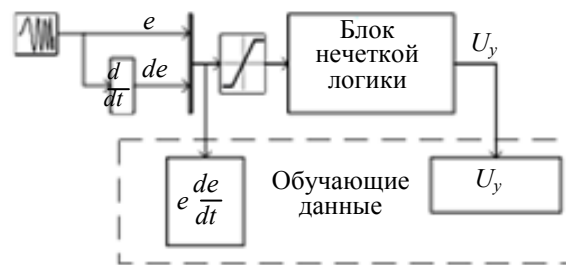


Рис. 5

Оптимизация, помимо повышения стабильности работы регулятора, позволяет также снизить объем вычислений. В данном случае удалось снизить количество используемых регулятором функций принадлежности (ФП) с 7 до 5, что также привело к уменьшению количества правил базы данных с 49 до 25, так как число правил определяется следующим выражением: $n_r = N_e N_{de}$, где n_r — число правил, N_e — число ФП в случае ошибки, N_{de} — число ФП в случае производной ошибки.

Моделирование систем с нечетким и нейронечетким регуляторами. Синтезированные регуляторы используются в качестве регулятора углового положения в системе подчиненного регулирования, приведенной на рис. 1. Были исследованы два режима работы следящей системы: режим перенаведения при максимальной скорости $\omega_3=5$ °/с и максимальном ускорении $a=5$ °/с² и режим слежения при $\omega_3=0,05$ °/с и $a=5$ °/с².

Следует отдельно выделить работу системы с ПИ-регулятором, так как в заданных режимах в системе возникают автоколебания, которые называют „шаговым режимом“ (см. рис. 6: *a* — слежение, *б* — перенаведение); эти колебания вызваны наличием нелинейного момента сухого трения. Здесь и на последующих рисунках: 1 — сигнал задания углового положения первой массы, 2 и 3 — угловое положение первой и второй массы соответственно.

Рассмотрим работу систем с синтезированными нечетким и нейронечетким регуляторами (рис. 7, 8, *a*, *б* соответственно). Анализ рисунков показывает отсутствие „шагового режима“ как при слежении, так и при перенаведении, фазовые траектории показывают устойчивость

системы. Даже при наличии ветрового момента (см. рис. 8) обе системы обрабатывают заданные режимы без „шагового режима“.

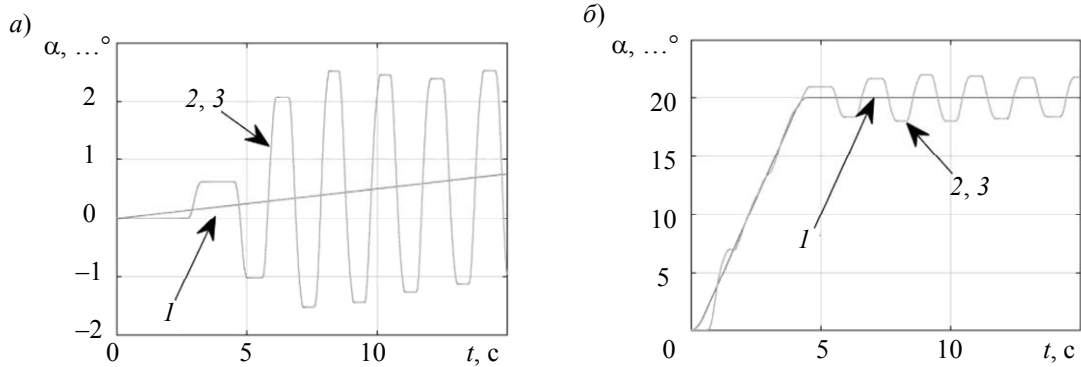


Рис. 6

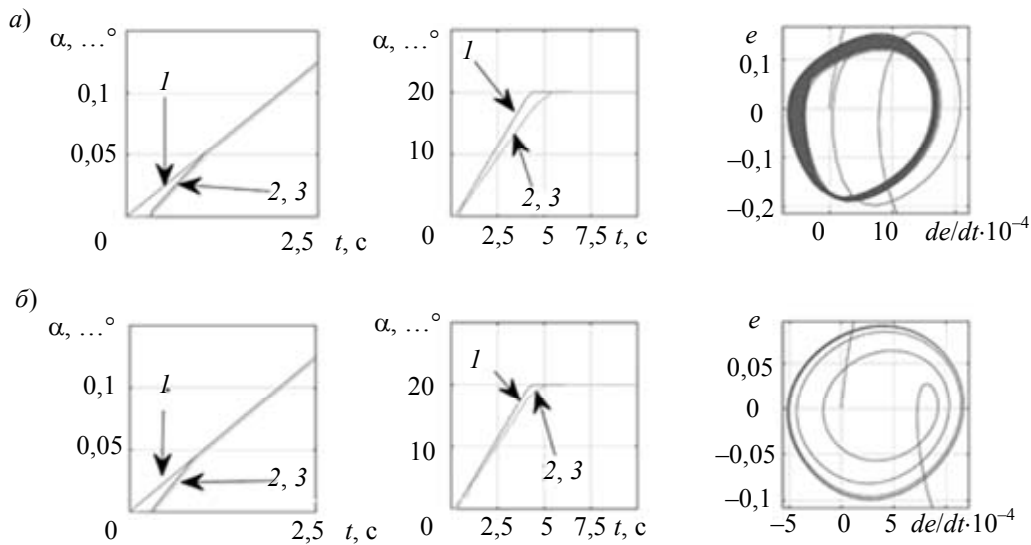


Рис. 7

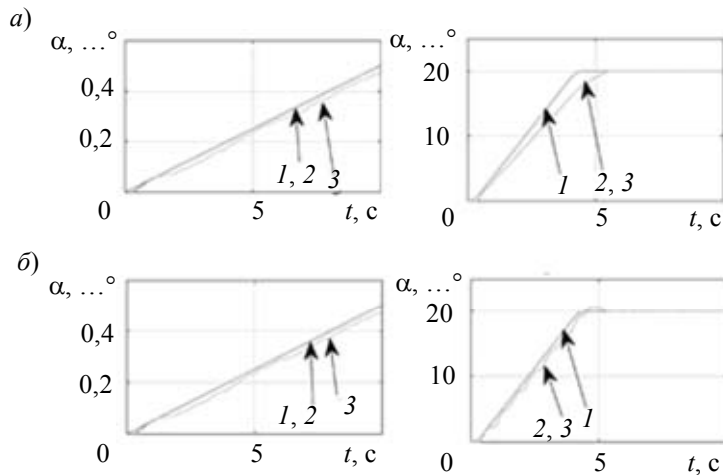


Рис. 8

Также проводилось исследование робастности системы при пятикратном изменении момента инерции второй массы J_2 (рис. 9). Результаты среднеквадратического отклонения (СКО) для рассмотренных режимов при наличии ветрового момента приведены в табл. 2.

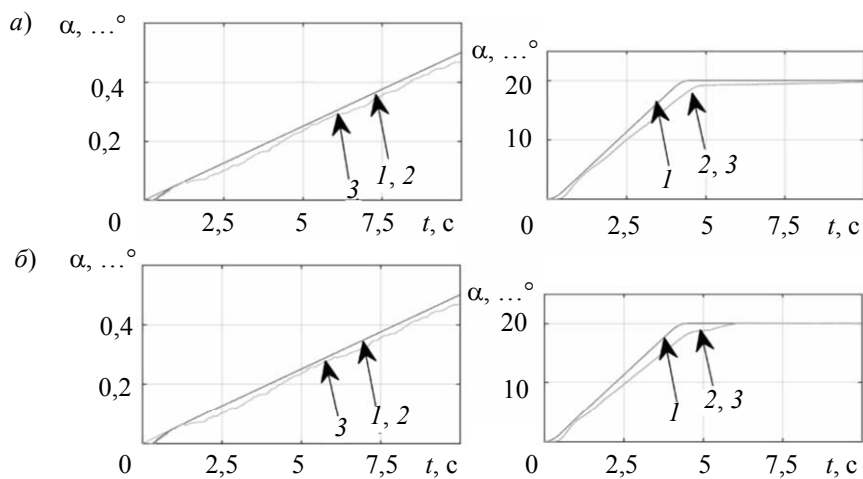


Рис. 9

Таблица 2

Режим	Момент инерции второй массы	Алгоритм	СКО, ..."
Слежение: $a=5 \text{ }^\circ/\text{c}^2, \omega_3=0,05 \text{ }^\circ/\text{c}$	J_2	СУ с ННР	0,2298
		СУ с НР	0,1847
Перенаведение: $a=5 \text{ }^\circ/\text{c}^2, \omega_3=5 \text{ }^\circ/\text{c}$	J_2	СУ с ННР	0,4439
		СУ с НР	22,1367
Слежение: $a=5 \text{ }^\circ/\text{c}^2, \omega_3=0,05 \text{ }^\circ/\text{c}$	$5J_2$	СУ с ННР	1,0864
		СУ с НР	0,9353
Перенаведение: $a=5 \text{ }^\circ/\text{c}^2, \omega_3=5 \text{ }^\circ/\text{c}$	$5J_2$	СУ с ННР	3,4947
		СУ с НР	28,8136

Заключение. На основании данных об СКО и анализа фазовых траекторий показано, что разработанные системы управления с нечетким и нейронечетким регуляторами обладают прецизионными свойствами и являются устойчивыми. Исключение составляет система с нечетким регулятором, которая при работе в режиме перенаведения обладает установившейся ошибкой на порядок выше, чем система с нейронечетким регулятором. Это означает, что оптимизация регулятора с использованием нейронной сети позволила расширить диапазон стабильной работы нечеткого регулятора, а также повысить его робастность.

Таким образом, применение нечетких и нейронечетких регуляторов в синтезированных системах управления позволяет устранить „шаговый режим“, который возникал в системе с ПИ-регулятором; благодаря этому достигнуты высокие точностные показатели синтезированных систем, что позволяет сделать вывод о применимости указанных регуляторов в системах управления сложными следящими комплексами.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 08-08).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толмачев В. А., Субботин Д. А. Синтез системы управления электропривода оси сканирования инфракрасного телескопа // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. Т. 11, № 5. С. 53—58.
2. Толмачев В. А., Никитина М. В., Сергеева М. Е. Синтез системы управления электропривода азимутальной оси алтайского телескопа ТИ-3.12// Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2010. Т. 10, № 5. С. 39—43.
3. Бобцов А. А., Никифоров В. О., Пыркин А. А. Адаптивное управление возмущенными системами: Учеб. пособие. СПб: Ун-т ИТМО, 2015. 126 с.
4. Демидова Г. Л., Ловлин С. Ю., Цветкова М. Х. Синтез следящего электропривода азимутальной оси телескопа с эталонной моделью в контуре положения // Вестн. ИГЭУ. 2011. Вып. 2. С. 77—81.

5. Лукичев Д. В., Демидова Г. Л. Нечеткая система управления позиционным следящим электроприводом опорно-поворотных устройств с нежесткими осями // Вестн. ИГЭУ. 2013. № 6. С. 60—64.
6. Kuzin A. Y., Lukichev D. V., Demidova G. L., Aleksandr S. V. Application of adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) controller in servodrive with multi-mass object // Proc. of the 25th Intern. Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED), Moscow, Febr., 2018 [Электронный ресурс]: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8321388>>.
7. 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.
8. Усольцев А. А., Смирнов Н. А. Нечеткий регулятор в системе управления следящим электроприводом с ограничением по скорости // Вестн. ИГЭУ. 2011. № 3. С. 27—32.
9. Ильина А. Г., Лукичев Д. В., Усольцев А. А. Оптимальное управление движением при позиционировании и его моделирование в среде MatLab/Simulink // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 6. С. 63—68.
10. Ключев В. И. Теория электропривода: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
11. Хижняков Ю. Н., Южаков А. А. Нейронечеткий регулятор напряжения объекта управления // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 12. С. 51—56.
12. Brock S. Application of ANFIS Controller for Two-Mass — System // ESIT 2000, 14—15 Sept. 2000, Aachen, Germany. P. 357—360.
13. Pajchrowski T., Urban'ski K., Zawirski K. Artificial neural network based robust speed control of permanent magnet synchronous motors // COMPEL - The Intern. Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. 2006. Vol. 25, iss. 1. P. 220—234.
14. Pajchrowski T., Urbanski K., Zawirski K. Robust speed control of PMSM servodrive based on ANN application // Electrical Power Electronics 2003: Proc., Toulouse, France, 2—4 Sept. 2003. Paper 833.

Сведения об авторах

- | | |
|-------------------------------------|---|
| Дмитрий Вячеславович Лукичев | — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: lukichev@ets.ifmo.ru |
| Алексей Юрьевич Кузин | — Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; инженер; E-mail: cuzinaleksey@yandex.ru |
| Галина Львовна Демидова | — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: demidova@ets.ifmo.ru |
| Сергей Юрьевич Ловлин | — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; E-mail: seri-l@yandex.ru |
| Иван Николаевич Жданов | — Университет ИТМО, факультет систем управления и робототехники; ассистент; E-mail: zhdanov@ets.ifmo.ru |

Поступила в редакцию
25.06.18 г.

Ссылка для цитирования: Лукичев Д. В., Кузин А. Ю., Демидова Г. Л., Ловлин С. Ю., Жданов И. Н. Применение нечетких и нейронечетких регуляторов в системе управления двухмассовым объектом с нелинейными возмущениями // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 1. С. 32—39.

APPLICATION OF FUZZY AND NEURO-FUZZY CONTROLLERS IN THE CONTROL SYSTEM OF TWO-MASS OBJECT WITH NONLINEAR DISTURBANCES

D. V. Lukichev, A. Yu. Kuzin, G. L. Demidova, S. Yu. Lovlin, I. N. Zhdanov

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: cuzinaleksey@yandex.ru

A method of synthesis and analysis of control algorithms based on fuzzy logic and neural networks is presented. A two-mass electromechanical system with a nonlinear perturbation in the form of a dry friction torque is used as an example. Behavior of the synthesized system under the influence of the wind

torque is studied. Robustness of the systems with variation of the second mass inertia as a parametric disturbance is analyzed. The analysis of the obtained results allows to estimate the expediency of application of the considered algorithms.

Keywords: electric drive, fuzzy logic, ANFIS, neural networks, robust control, position control

REFERENCES

1. Tolmachev V.A., Subbotin D.A. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 5(11), pp. 53–58. (in Russ.)
2. Tolmachev V.A., Nikitina M.V., Sergeyeva M.E. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2010, no. 5(10), pp. 39–43. (in Russ.)
3. Bobtsov A.A., Nikiforov V.O., Pyrkin A.A. *Adaptivnoye upravleniye vozmushchennymi sistemami. Uchebnoye posobiye* (Adaptive Control of Perturbed Systems. Manual), St. Petersburg, 2015, 126 p. (in Russ.)
4. Demidova G.L., Lovlin S.Yu., Tsvetkova M.Kh. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2011, no. 2, pp. 77–81. (in Russ.)
5. Lukichev D.V., Demidova G.L. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2013, no. 6, pp. 60–64. (in Russ.)
6. Kuzin A.Y., Lukichev D.V., Demidova G.L., Aleksandr S.V. *25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED)*, 2018, pp. 1–6.
7. Demidova G.L., Kuzin A.Yu., Lukichev D.V. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, no. 5(16), pp. 872–878, DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-872-878. (in Russ.)
8. Usol'tsev A.A., Smirnov N.A. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2011, no. 3, pp. 27–32. (in Russ.)
9. Il'ina A.G., Lukichev D.V., Usol'tsev A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, no. 6(51), pp. 63–63. (in Russ.)
10. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* (Theory of the Electric Drive), Moscow, 2001, 704 p. (in Russ.)
11. Khizhnyakov Yu.N., Yuzhakov A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, no. 12(54), pp. 51–56. (in Russ.)
12. Brock St. *ESIT 2000*, 14–15 September 2000, Aachen, Germany, pp. 357–360.
13. Pajchrowski T., Urban'ski K. and Zawirski K. *COMPEL International Journal of Computations and Mathematics in Electrical*, 2006, no. 1(25), pp. 220–234.
14. Pajchrowski T. Urbański K. Zawirski K. *Robust speed control of PMSM servodrive based on ANN application, Electrical Power Electronics, EPE-2003*, 2–4 September 2003, Toulouse, p. 833 (on CD-ROM),

Data on authors

Dmitry V. Lukichev	—	PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: lukichev@ets.ifmo.ru
Alexey Yu. Kuzin	—	ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; engineer; E-mail: cuzinaleksey@yandex.ru
Galina L. Demidova	—	PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: demidova@ets.ifmo.ru
Sergey Yu. Lovlin	—	PhD, Associate Professor; ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; E-mail: seri-l@yandex.ru
Ivan N. Zhdanov	—	ITMO University, Faculty of Control Systems and Robotics; Assistant; E-mail: zhdanov@ets.ifmo.ru

For citation: Lukichev D. V., Kuzin A. Yu., Demidova G. L., Lovlin S. Yu., Zhdanov I. N. Application of fuzzy and neuro-fuzzy controllers in the control system of two-mass object with nonlinear disturbances. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 1. P. 32–39 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-1-32-39