

В.В. Игнатъев, В.М. Курейчик, О.Б. Спиридонов, А.С. Игнатъева

МЕТОД ГИБРИДНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ НЕЙРО-НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА*

Ключевой целью работы является разработка метода управления позволяющего упростить, автоматизировать и унифицировать процесс проектирования гибридных систем, являющихся основой современной автоматизации. Для достижения определенной цели разработан метод управления техническим объектом на основе построения адаптивной системы нейро-нечеткого вывода. Объектами системы нейро-нечеткого вывода являются классическая и нечеткая модели управления. Взаимодействие между моделями обеспечивается с помощью разработанной гибридной системы управления. Результатом взаимодействия двух моделей является автоматическое формирование базы правил нечеткого регулятора на основе знаний об объекте управления, полученных при его управлении с помощью классического регулятора. В разработанной адаптивной системе нейро-нечеткого вывода сигналы ошибки и управления в классической модели используются в качестве данных для построения гибридной сети. Сигналы ошибки и управления в нечеткой модели с уже сформированными автоматически правилами нечеткого вывода используются в качестве данных для проверки построенной гибридной сети с целью выявления факта ее переобучения. Таким образом, в ходе управления техническим объектом с помощью гибридной системы полностью исключается необходимость знаний эксперта в предметной области для настройки параметров нечеткого регулятора, что позволяет управлять трудно формализуемыми объектами в условиях неопределенности. Для получения достоверных результатов исследований разработана гибридная система управления, состоящая из классической и нечеткой моделей. Получены числовые значения сигналов ошибки и управления в дискретные моменты времени в результате взаимодействия двух моделей. Сформированы специальные файлы для построения и проверки гибридной сети в виде числовых матриц. Разработка гибридной сети проведена в редакторе ANFIS пакета MATLAB. Графически показана сгенерированная структура системы нечеткого вывода FIS типа Сугено. Приведена визуализация зависимости ошибок обучения и проверки от количества циклов обучения. Построена поверхность системы нечеткого вывода, позволяющая оценить зависимость выходной переменной от входных.

Автоматизация; управление; гибридная сеть; классическая модель; нечеткая модель; база нечетких правил; адаптация; нейро-нечеткий вывод; обучение.

V.V. Ignatyev, V.M. Kureychik, O.B. Spiridonov, A.S. Ignatyeva

METHOD OF HYBRID CONTROL BASED ON THE ADAPTIVE SYSTEM OF NEURO-FUZZY INFERENCE

The key purpose of the work is development of a method of control that allows simplifying, automating and unifying the process of design of the hybrid systems which are a basis of modern automation. To achieve a definite purpose, a method of control of a technical object based on the construction of an adaptive system of neuro-fuzzy inference is developed. The objects of the system of neuro-fuzzy inference are the classical and fuzzy models of control. Information exchange between models is provided by means of the developed hybrid control system. The result of the interaction of the two models is the automatic formation of the base of fuzzy controller rules based on knowledge about the control object obtained with its control using the classical controller. In the developed adaptive system of neuro-fuzzy inference signals of error and control in the classical model are used as data for creation a hybrid network. Signals of error and control in a fuzzy mod-

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-07-05523) и ГЗ 2.5537.2017/6.7.

el with automatically generated fuzzy inference rules are used as data to verify the created hybrid network in order to detect the fact of its retraining. Thus, during the control of a technical object by means of a hybrid system, the knowledge of an expert in the subject area for adjusting the parameters of the fuzzy controller are completely eliminated, that allows to control difficultly formalizable objects in conditions of uncertainty. To obtain reliable research results, a hybrid control system, consisting of classical and fuzzy models is developed. Numerical values of the error and control signals are obtained at discrete timepoints as a result of the interaction of the two models. Special files for creating and testing a hybrid network in the form of numerical matrices are generated. The hybrid network is developed in the ANFIS editor of the MATLAB package. The generated structure of the FIS fuzzy inference system of the Sugeno type is graphically shown. The visualization of the dependence of training and verification errors from the number of training cycles is given. The surface of the fuzzy inference system is constructed, that allows estimating the dependence of the output variable on the input.

Automation, control; hybrid network; classical model; fuzzy model; base of fuzzy rules; adaptation; neuro-fuzzy inference; training.

Введение. В настоящее время для решения прикладных задач управления различными техническими объектами успешно применяются регуляторы, основанные на использовании классической теории автоматического управления, аппарата нечеткой логики, искусственных нейронных и нейро-нечетких сетей.

При этом гибридные системы управления, соединяющие, по мнению специалистов [1–3], формализуемые и неформализуемые знания, являются наиболее перспективным средством для решения задач управления трудно формализуемыми объектами в условиях неопределенности. Одним из наиболее распространенным подходом к построению гибридных систем (гибридных регуляторов) является подход, который заключается в последовательном или параллельном включении нечеткого и классического регуляторов.

Анализ и современное состояние исследований по научной проблеме. В работах [4–10] применяются нечеткие модели для настройки коэффициентов ПИД-регулятора при изменении параметров объекта управления. В работе [11] показана организация взаимодействия составных частей гибридного регулятора, идея которой заключается в получении нечетких оценок эффективности использования ПИД и нечеткого регуляторов для решения задачи управления техническим объектом с последующим введением весовых коэффициентов управляющих воздействий для каждого из регуляторов. В работе [12] в качестве основного управляющего устройства используется классический ПИД регулятор, а в качестве компенсатора возмущающих воздействий – нечеткий регулятор. В работе [13] представлен гибридный ПИД-регулятор, настройка которого осуществляется на основе генетического алгоритма.

Анализ работ последних лет по тематике разработки и применения гибридных систем управления позволяет говорить о том, что для управления объектом используются либо отдельные методы (классическая теория автоматического управления, аппарат нечеткой логики, искусственные нейронные и нейро-нечеткие сети), либо классический регулятор, коэффициенты которого настраиваются с помощью методов искусственного интеллекта.

Предлагаемый метод. В данной работе предлагается принципиально новый метод управления, основанный на совместном использовании классической и нечеткой моделей и позволяющий получать желаемое управление объектом за счет построения адаптивной системы нейро-нечеткого вывода. При этом для обучения используются проверочные данные, полученные также при совместной работе двух моделей.

Таким образом, работа гибридной системы делится на два этапа.

На первом этапе на основе разработанного в работе [14] гибридного алгоритма формирования базы правил нечеткого регулятора, происходит автоматическое формирование нечетких правил (полученные в результате работы классического

регулятора значения отклонения системы θ , интеграл отклонения $\int \theta dt$ и управляющего воздействия U на объект служат исходными значениями для построения базы правил нечеткой модели управления). При этом полученная в работе [14] модель управления на основе гибридного алгоритма менее зависима от знаний эксперта (а во многих задачах знания эксперта не требуются) [15–17].

На втором этапе происходит построение адаптивной системы нейро-нечеткого вывода. При этом при обучении полученной (сгенерированной) на первом этапе системы нечеткого вывода используются в качестве проверочных данных также значения отклонения системы θ , интеграл отклонения $\int \theta dt$ и управляющего воздействия U , но уже полученные в результате работы нечеткого регулятора.

Результатом операций, выполненных в рамках описанных двух этапов, является полноценная гибридная система управления, позволяющая получать желаемое управление в зависимости от степени сложности решаемых задач в условиях неопределенности, не зависеть от знаний эксперта в предметной области и быстро реагировать на изменения параметров объекта управления.

Реализация предлагаемого метода. Для демонстрации предлагаемого метода воспользуемся разработанной в работе [14] моделью гибридного управления. В представленной на рис. 1 модели управление объектом может осуществляться и с помощью ПИ-регулятора и с помощью ПИ-FUZZY-регулятора, в случае изменения его параметров.

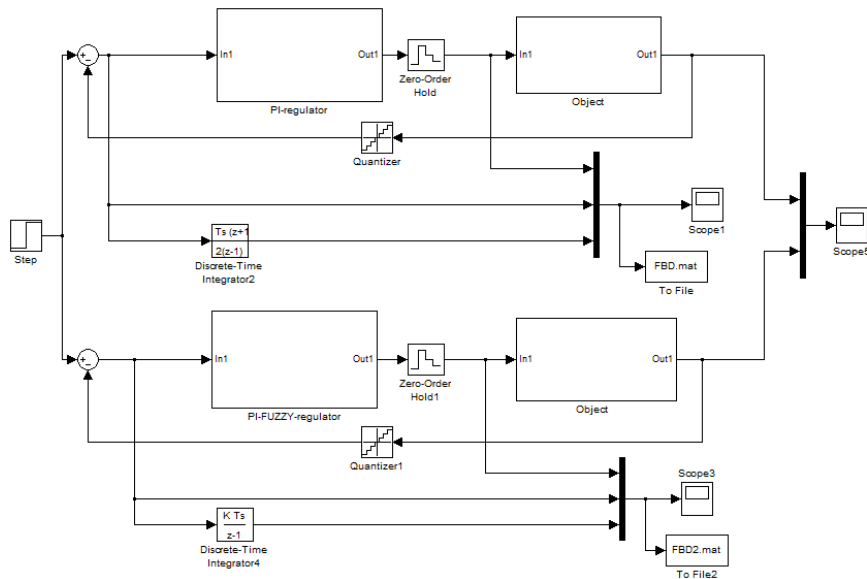


Рис. 1. Гибридная модель управления в MATLAB

Как видно из рисунка, численные значения отклонения системы θ , интеграл отклонения $\int \theta dt$ и управляющего воздействия U записываются в специальный файл FBD.mat (для реализации первого этапа) и FBD2.mat для реализации второго этапа.

Матрица значений отклонения системы θ , интеграла отклонения $\int \theta dt$ и управляющего воздействия U , полученная в результате работы классического регулятора на первом этапе и нечеткого регулятора на первом этапе представлена на рис. 2.

1.0000	0	0.2210	1.0000	0	0.1417
0.9834	0.0080	0.2261	0.9939	0.0060	0.1417
0.9396	0.0157	0.2249	0.9766	0.0119	0.2174
0.8761	0.0229	0.2190	0.9458	0.0177	0.2130
0.7996	0.0296	0.2095	0.9038	0.0233	0.2130
0.7155	0.0357	0.1976	0.8536	0.0286	0.2058
0.6283	0.0411	0.1842	0.7973	0.0336	0.1987
0.5414	0.0458	0.1702	0.7371	0.0382	0.1987
0.4576	0.0498	0.1561	0.6744	0.0425	0.1846
0.3787	0.0531	0.1424	0.6110	0.0464	0.1846
0.3062	0.0558	0.1294	0.5482	0.0499	0.1846
0.2409	0.0580	0.1173	0.4870	0.0530	0.1533
0.1831	0.0597	0.1064	0.4283	0.0558	0.1333
0.1330	0.0610	0.0968	0.3729	0.0582	0.1333
0.0903	0.0619	0.0883	0.3215	0.0603	0.1150
0.0547	0.0624	0.0811	0.2747	0.0621	0.1047
0.0257	0.0627	0.0750	0.2323	0.0637	0.1047
0.0027	0.0629	0.0701	0.1945	0.0650	0.0690
-0.0150	0.0628	0.0661	0.1627	0.0660	0.0677
-0.0281	0.0626	0.0630	0.1363	0.0669	0.0677
-0.0373	0.0624	0.0607	0.1144	0.0677	0.0669
-0.0430	0.0620	0.0590	0.0963	0.0683	0.0664
-0.0461	0.0617	0.0580	0.0811	0.0689	0.0664
-0.0469	0.0613	0.0574	0.0686	0.0693	0.0660
-0.0460	0.0609	0.0572	0.0582	0.0697	0.0657
-0.0439	0.0606	0.0572	0.0495	0.0701	0.0657
-0.0408	0.0602	0.0576	0.0423	0.0703	0.0655
-0.0371	0.0599	0.0580	0.0363	0.0706	0.0654
-0.0330	0.0596	0.0586	0.0313	0.0708	0.0654
-0.0289	0.0594	0.0593	0.0271	0.0710	0.0653
-0.0247	0.0592	0.0599	0.0236	0.0711	0.0652
-0.0207	0.0590	0.0606	0.0207	0.0712	0.0652
-0.0170	0.0589	0.0613	0.0182	0.0714	0.0652
-0.0135	0.0587	0.0619	0.0161	0.0715	0.0652
-0.0104	0.0586	0.0625	0.0144	0.0716	0.0652
-0.0077	0.0586	0.0630	0.0129	0.0716	0.0651
-0.0054	0.0585	0.0635	0.0116	0.0717	0.0651
-0.0034	0.0585	0.0639	0.0106	0.0718	0.0651
-0.0017	0.0585	0.0642	0.0096	0.0718	0.0651
-0.0004	0.0584	0.0645	0.0088	0.0719	0.0651
0.0007	0.0584	0.0647	0.0082	0.0719	0.0651
0.0015	0.0585	0.0649	0.0076	0.0720	0.0651
0.0021	0.0585	0.0651	0.0070	0.0720	0.0651
0.0025	0.0585	0.0652	0.0066	0.0721	0.0651
0.0027	0.0585	0.0653	0.0062	0.0721	0.0650
0.0029	0.0585	0.0653	0.0058	0.0722	0.0650
0.0029	0.0586	0.0653	0.0055	0.0722	0.0650
0.0028	0.0586	0.0653	0.0052	0.0722	0.0650
0.0026	0.0586	0.0653	0.0049	0.0722	0.0650
0.0025	0.0586	0.0653	0.0047	0.0723	0.0650
0.0023	0.0586	0.0653	0.0044	0.0723	0.0650

Рис. 2. Числовые значения сигналов θ , $\int \theta dt$, U

Отображенные в левом столбце числовые значения (слева направо: θ , $\int \theta dt$, U), являются обучающими данными, используемыми для построения гибридной сети, отображенные в правом столбце – проверочные данные, используемые для проверки гибридной сети с целью выявления факта ее переобучения.

Стоит отметить, что применительно к модели гибридной сети (искусственной нейронной сети) концептуальной основой и составной частью искусственной нейронной сети является искусственный нейрон, структура которого изображена на рис. 3.

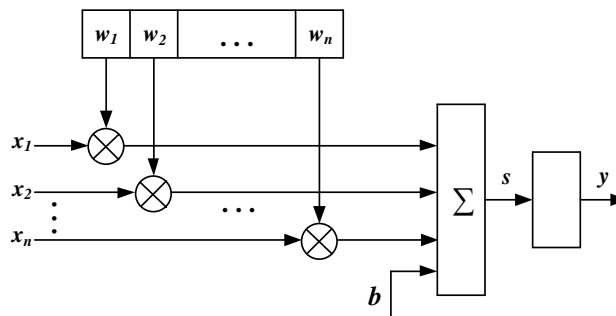


Рис. 3. Структура искусственного нейрона

Математическая модель нейрона может быть записана в виде аналитического выражения:

$$s = \sum_{i=1}^n \omega_i + x_i + b, \quad (1)$$

$$s = f(s), \quad (2)$$

где ω_i – вес множителя ($i \in \{1, 2, \dots, n\}$), b – значение смещения, x_i – компонент вектора входа или входного сигнала ($i \in \{1, 2, \dots, n\}$), s – результат суммирования, y – выходной сигнал нейрона, f – функция активации нейрона (некоторое линейное преобразование).

После подготовки и загрузки обучающих (рис. 4,а) и проверочных данных (рис. 4,б) сгенерируем структуру системы нечеткого вывода FIS типа.

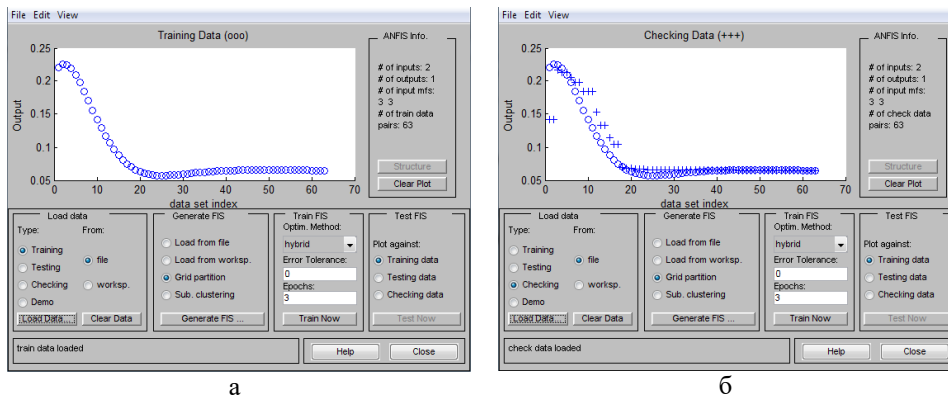


Рис. 4. Структура обучающих и проверочных данных

Визуализация сгенерированной структуры нечеткого вывода FIS типа Сугено представлена на рис. 5.

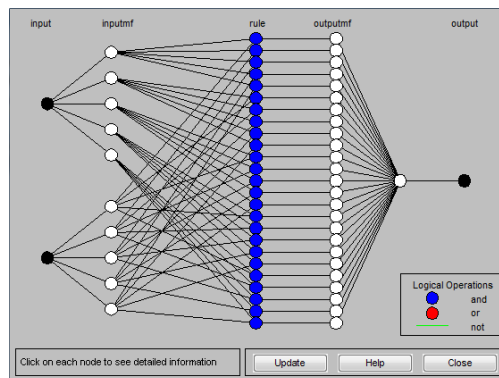
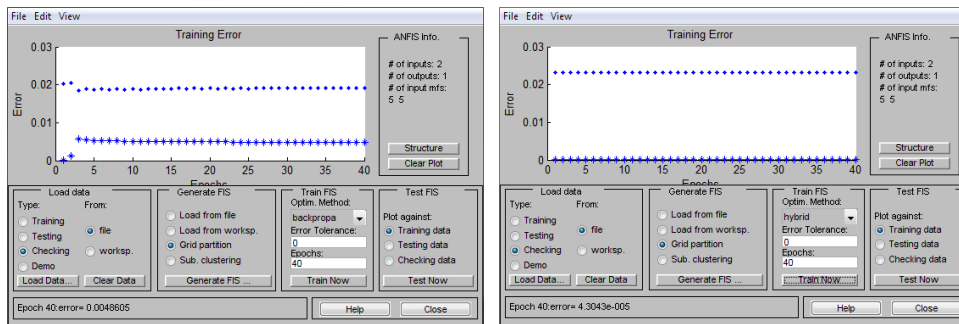


Рис. 5. Структура сгенерированной системы нечеткого вывода

Обучение гибридной сети проведем двумя методами: обратного распространения и гибридным, представляющего собой комбинацию метода наименьших квадратов и метода убывания обратного градиента [3]. Установить соответствующий тип обучения можно выполнить установить соответствующие настройки в редакторе ANFIS пакета MATLAB. Результаты обучения методом обратного распространения представлены на рис. 6,а), гибридным методом – на рис. 6,б).



а

б

Рис. 6. Графики зависимости ошибок обучения и проверки от количества циклов обучения

На верхнем графике каждого из рисунков показана зависимость ошибки проверки от количества циклов обучения, а на нижнем графике – зависимость ошибки обучения от количества циклов обучения.

Анализ полученных результатов. Из графиков на рис. 6,а) видно, что применяя метод обратного распространения, обучение заканчивается на третьем шаге после двух циклов, что подтверждается данными из командной строки пакета MATLAB:

Start training ANFIS ...

1	4.30425e-005	0.0232574
2	4.69149e-005	0.0223501

Designated epoch number reached --> ANFIS training completed at epoch 2.

Графики на рис. 6,б) показывают, что применяя гибридный метод, обучение заканчивается на первом шаге. Это подтверждает, что разработанный в работе [14] гибридный алгоритм формирования базы правил нечеткого регулятора работает правильно, т.к. при обучении, как было отмечено ранее, проверочными данными являются данные, полученные в результате работы нечеткого регулятора (θ , $f\theta dt$, U).

В дальнейшем для настройки параметров построенной и обученной сети можно использовать графические средства программного пакета FUZZY LOGIC TOOLBOX [3, 18]. Также можно просмотреть поверхность нечеткого вывода [19, 20] с целью общего анализа адекватности нечеткой модели. Вид поверхности нечеткого вывода представлен на рис. 7.

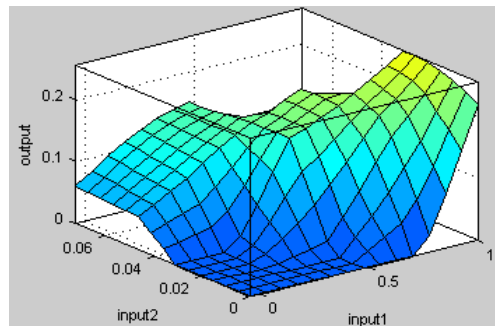


Рис. 7. Вид поверхности нечеткого вывода

Заключение. Существующие прикладные задачи в автоматизации требуют применения концептуально новых подходов к их решению. Это обусловлено, прежде всего, трудностями, связанными с нелинейным характером зависимостей переменных при управлении реальными объектами, в частности при решении задач нелинейного и ситуационного управления.

Представленные результаты исследований наглядно показывают, что предложенный метод гибридного управления на основе адаптивной системы нейронечеткого вывода в сочетании с гибридным алгоритмом формирования базы правил нечеткого регулятора позволяет:

- ◆ создавать гибридные системы управления, обладающие повышенной робастностью;
- ◆ обеспечивать высокое качество управления при изменении параметров объекта за счет постоянного переобучения;
- ◆ прогнозировать возможное поведение объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесников А.В. Гибридные интеллектуальные системы: теория и технология разработки. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 600 с.
2. Деменков Н.П. Нечёткое управление в технических системах: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 200 с.
3. Леоненков А.В. Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 736 с.
4. Thanana Nuchkrua, Thananchai Leephakpreeda. Fuzzy Self-Tuning PID Control of Hydrogen-Driven Pneumatic Artificial Muscle Actuator // Journal of Bionic Engineering. – 2013. – Vol. 10. – P. 329-340.
5. SHI Dequan, GAO Guili, GAO Zhiwei, XIAO Peng. Application of expert fuzzy pid method for temperature control of heating furnace // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 29. – P. 257-261.
6. Zhiqiang Yang, Jimin Zhang, Zhongchao Chen, Baoan Zhang. Semi-active control of high-speed trains based on fuzzy PID control // Procedia Engineering. – 2011. – Vol. 15. – P. 521-525.
7. Mann G.K.I., Gosine R.G. Three-dimensional min-max-gravity based fuzzy PID inference analysis and tuning // Fuzzy Sets and Systems. – 2005. – Vol. 156. – P. 300-323.
8. Wu Y., Jiang H., Zou M. The Research on Fuzzy PID Control of the Permanent Magnet Linear Synchronous Motor // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 24. – P. 1311-1318.
9. Abbasi E., Mahjoob M. J., Yazdanpanah R. Controlling of Quadrotor UAV Using a Fuzzy System for Tuning the PID Gains in Hovering Mode // Fourth International Conference on Advances in Computer Engineering – ACE 2013. – Frankfurt, Germany, 2013. Int. j. adv. robot. syst. – 2013. – Vol. 10, 380:2013.
10. Kai Ou, Ya-Xiong Wang, Zhen-Zhe Li, Yun-De Shen, Dong-Ji Xuan. Feedforward fuzzy-PID control for air flow regulation of PEM fuel cell system // International journal of hydrogen energy. – 21 September 2015. – Vol. 40, Issue 35. – P. 11686-11695.
11. Ahmet Karli, Vasfi Emre Omurlu, Utku Buyuksahin, Remzi Artar, Ender Ortak. Self tuning fuzzy PD application on TI TMS320F 28335 for an experimental stationary quadrotor. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6151404/> (дата обращения 23.04.2017).
12. Hamed Beirami, Ali Zargar Shabestari, Mohammad Mahdi Zerafat. Optimal PID plus fuzzy controller design for a PEM fuel cell air feed system using the self-adaptive differential evolution algorithm // International journal of hydrogen energy. – 10 August 2015. – Vol. 40, Issue 30. – P. 9422-9434.
13. Jahedi G., Ardehali M.M. Genetic algorithm-based fuzzy-PID control methodologies for enhancement of energy efficiency of a dynamic energy system // Energy Conversion and Management. – 2011. – Vol. 52. – P. 725-732.
14. Игнатъев В.В., Спиридонов О.Б. Гибридный алгоритм формирования базы правил нечеткого регулятора // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 11 (172). – С. 177-186.

15. *Игнатьев В.В.* Синтез систем гибридного управления на основе объединения классической и нечеткой моделей объекта // *Materiály VIII mezinárodní vědecko – praktická konference «Dny vědy – 2012»*. – Díl 94. Technické vědy: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o – 88stran. –P. 54-57.
16. *Ignatyev V.V.* Fuzzy control system in an automatic and automated production // *Материали за 9-а международна научна практична конференция, «Ключови въпроси в съвременната наука»*. – 2013. – Т. 36. Технологии. София. «Бял ГРАД-БГ» ООД. – P. 41-43.
17. *Ignatyev V.V., Finaev V.I.* The use of hybrid regulator in design of control systems // *World Applied Sciences Journal*. – 2013. – Vol. 23 (10). – P. 1291-1297. – ISSN 1818-4952 © IDOSI Publications, 2013. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.10.13144.
18. *Крулов В.В., Дли М.И., Голубов Р.Ю.* Нечёткая логика и искусственные нейронные сети. – М., 2004. – 224 с.
19. *Дьяконов В.* MATLAB: учебный курс. – СПб.: Питер, 2001. – 560 с.
20. *Дьяконов В., Крулов В.* Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.

REFERENCES

1. *Kolesnikov A.V.* Gibridnye intellektual'nye sistemy: teoriya i tekhnologiya razrabotki [Hybrid intelligent systems: theory and technology of development]. St. Petersburg: Izd-vo SPbGTU, 2001, 600 p.
2. *Demenev N.P.* Nechetkoe upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh: ucheb. posobie [Fuzzy control in technical systems: a training manual]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2005, 200 p.
3. *Leonov A.V.* Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH [Fuzzy modeling in the MATLAB and fuzzyTECH environment]. St. Petersburg: BKhV – Peterburg, 2005, 736 p.
4. *Thanana Nuchkrua, Thananchai Leephakpreeda.* Fuzzy Self-Tuning PID Control of Hydrogen-Driven Pneumatic Artificial Muscle Actuator, *Journal of Bionic Engineering*, 2013, Vol. 10, pp. 329-340.
5. *SHI Dequan, GAO Guili, GAO Zhiwei, XIAO Peng.* Application of expert fuzzy pid method for temperature control of heating furnace, *Procedia Engineering*, 2012, Vol. 29, pp. 257-261.
6. *Zhiqiang Yang, Jimin Zhang, Zhongchao Chen, Baoan Zhang.* Semi-active control of high-speed trains based on fuzzy PID control, *Procedia Engineering*, 2011, Vol. 15, pp. 521-525.
7. *Mann G.K.I., Gosine R.G.* Three-dimensional min–max-gravity based fuzzy PID inference analysis and tuning, *Fuzzy Sets and Systems*, 2005, Vol. 156, pp. 300-323.
8. *Wu Y., Jiang H., Zou M.* The Research on Fuzzy PID Control of the Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, *Physics Procedia*, 2012, Vol. 24, pp. 1311-1318.
9. *Abbasi E., Mahjoob M. J., Yazdanpanah R.* Controlling of Quadrotor UAV Using a Fuzzy System for Tuning the PID Gains in Hovering Mode, *Fourth International Conference on Advances in Computer Engineering – ACE 2013. – Frankfurt, Germany, 2013. Int. j. adv. robot. syst.* 2013, Vol. 10, 380:2013.
10. *Kai Ou, Ya-Xiong Wang, Zhen-Zhe Li, Yun-De Shen, Dong-Ji Xuan.* Feedforward fuzzy-PID control for air flow regulation of PEM fuel cell system, *International journal of hydrogen energy*, 21 September 2015, Vol. 40, Issue 35, pp. 11686-11695.
11. *Ahmet Karli, Vasfi Emre Omurlu, Utku Buyuksahin, Remzi Artar, Ender Ortak.* Self tuning fuzzy PD application on TI TMS320F 28335 for an experimental stationary quadrotor. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6151404/> (accessed 23 April 2017).
12. *Hamed Beirami, Ali Zargar Shabestari, Mohammad Mahdi Zerafat.* Optimal PID plus fuzzy controller design for a PEM fuel cell air feed system using the self-adaptive differential evolution algorithm, *International journal of hydrogen energy*, 10 August 2015, Vol. 40, Issue 30, pp. 9422-9434.
13. *Jahedi G., Ardehali M.M.* Genetic algorithm-based fuzzy-PID control methodologies for enhancement of energy efficiency of a dynamic energy system, *Energy Conversion and Management*, 2011, Vol. 52, pp. 725-732.
14. *Ignat'ev V.V., Spiridonov O.B.* Gibridnyy algoritim formirovaniya bazy pravil ne-chetkogo regul'yatora [Hybrid algorithm of formation of base of rules of the fuzzy controller], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 11 (172), pp. 177-186.

15. *Ignat'ev V.V.* Sintez sistem gibridnogo upravleniya na osnove ob"edineniya klassicheskoy i nechetkoy modeley ob"ekta [Synthesis of hybrid control systems based on combining classical and fuzzy object models], *Materiály VIII mezinárodní vědecko – praktická konference «Dny vědy – 2012»*. – Díl 94. *Technické vědy: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o – 88 stran*, pp. 54-57.
16. *Ignatyev V.V.* Fuzzy control system in an automatic and automated production [Fuzzy control system in an automatic and automated production], *Materiali za 9-a mezhduнародna nauchna praktichna konferentsiya, «Klyuchovi v"prosi v s"vremennata nauka»*, 2013, Vol. 36. *Tekhnologii. Sofiya. «Byal GRAD-BG» OOD*, pp. 41-43.
17. *Ignatyev V.V., Finaev V.I.* The use of hybrid regulator in design of control systems, *World Applied Sciences Journal*, 2013, Vol. 23 (10), pp. 1291-1297. ISSN 1818-4952 © IDOSI Publications, 2013. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.10.13144.
18. *Kruglov V.V., Dli M.I., Golubov R.Yu.* Nechetkaya logika i iskusstvennyye neyronnye seti [Fuzzy logic and artificial neural networks]. Moscow, 2004, 224 p.
19. *D'yakonov V.* MATLAB: uchebnyy kurs [MATLAB: training course]. St. Petersburg: Piter, 2001, 560 p.
20. *D'yakonov V., Kruglov V.* Matematicheskie pakety rasshireniya MATLAB. Spetsial'nyy spravochnik [Mathematical expansion packages MATLAB. Special reference book]. St. Petersburg: Piter, 2001, 480 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Игнатъев Владимир Владимирович - Южный федеральный университет; e-mail: vova3286@mail.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: 89286083925; научно-конструкторское бюро моделирующих и управляющих систем; начальник отдела; к.т.н.

Спиридонов Олег Борисович – e-mail: oleg.spiridonov@mail.ru; тел.: 8863328099; научно-конструкторское бюро моделирующих и управляющих систем; директор; к.т.н.

Курейчик Виктор Михайлович – e-mail: vmkureychik@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Энгельса 1; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; д.т.н., профессор.

Игнатъева Александра Сергеевна - e-mail: alexandra_25@mail.ru; тел.: 89281377115; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

Ignatyev Vladimir Vladimirovich - Southern Federal University; e-mail: vova3286@mail.ru; 81, Petrovskaya street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79286083925; Design Bureau of Modelling and Controlling Systems; head of department; cand. of eng. sc.

Spiridonov Oleg Borisovich – e-mail: oleg.spiridonov@mail.ru; phone: +78634328099; Design Bureau of Modelling and Controlling Systems; director; cand. of eng. sc.

Kureychik Viktor Mikhailovich - e-mail: vmkureychik@sfedu.ru; 1, Engelsa street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371651; the department of computer aided design systems; dr. of eng. sc.; professor.

Ignatyeva Alexandra Sergeevna - e-mail: alexandra_25@mail.ru; phone: +79281377115; the department of computer aided design systems; graduate student.