

Клевцов Сергей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: sergkmps@mail.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: 88634328025; к.т.н.; доцент.

Клевцова Алла Борисовна – e-mail: alla-klevcova@mail.ru; старший преподаватель.

Klevtsov Sergey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: sergkmps@mail.ru; 81, Petrovsky street, Taganrog, 347900, Russia; phone: 88634328025; cand. of eng. sc.; associate professor.

Klevtsova Alla Borisovna – e-mail: alla-klevcova@mail.ru; the senior lecturer.

УДК 004.896

DOI 10.23683/2311-3103-2018-3-177-185

**В.В. Игнатьев, Д.А. Белоглазов, В.М. Курейчик, О.Б. Спиридонов,
А.С. Игнатьева**

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ
ПРОЦЕССА ГЕНЕРАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРАВИЛ СИСТЕМ
С НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КЛАССИЧЕСКИХ ПИ,
ПИД РЕГУЛЯТОРОВ***

*Предложен способ, позволяющий улучшить качество управления техническими объектами, задача автоматизации которых была решена с применением классической теории управления, таких регуляторов как ПИ, ПД, ПИД. Основная идея метода заключается в поэтапном замещении указанных регуляторов их гибридными аналогами, реализованными с применением аппарата нечеткой логики (нечеткий – ПИ, нечеткий – ПИД и т.д.). На первом этапе осуществляется сбор статистической информации о входах-выходах используемого регулятора (величина ошибки системы θ , интеграл ошибки $\int \theta dt$, величина выработанного управляющего воздействия U). Этап считается законченным, когда для автоматизируемого объекта будет создан набор данных, описывающих работу регулятора для всех режимов его эксплуатации. Следующий этап предполагает использование полученных статистических данных для синтеза базы управляющих правил гибридного(ых) регулятора(ов). Решение указанной задачи вручную возможно, однако процесс отличается значительной трудоёмкостью, сопряжен с существенным риском возникновения ошибок, выражающихся в создании дублирующихся или, что более критично противоречащих друг другу управляющих правил. Выявление указанных ошибок может потребовать от разработчика больших усилий и не гарантирует получения успешного результата. В связи с этим становится актуальной задача разработки и применения специализированного программного обеспечения, что и было сделано в данной работе. В результате длительность временных затрат разработчика снизилась на 98%, а риск ошибок сведен к нулю. Для удобства использования результат применения предлагаемого программного обеспечения представляется в виде *.fis файла, который может быть открыт и проанализирован в Fuzzy Logic Toolbox. В дальнейшем рассматриваемое программное приложение может быть перенесено из среды моделирования MATLAB на любой другой язык программирования.*

Автоматизация; управление; гибридный регулятор; программное приложение; MATLAB; классическая модель; нечеткая модель; база нечетких правил.

* Материалы статьи подготовлены при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (№18-38-00711\18) в Южном федеральном университете.

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

**SOFTWARE DEVELOPMENT IN AUTOMATION OF GENERATION
PROCESS OF CONTROL RULES IN SYSTEMS WITH FUZZY LOGIC BASED
ON DATA OF CLASSICAL PI, PID CONTROLLERS**

*The paper proposes a method to improve the quality of control of technical objects, the problem of automation of which was solved with the use of the classical control theory and such controllers as PI, PD, PID. The basic idea of the method consists in the gradual replacement of these controllers by their hybrid analogs realized with the use of the fuzzy logic apparatus (fuzzy – PI, fuzzy - PID, etc.). At the first stage, statistical information is collected about the inputs and outputs of the controller used (system error value θ , error integral $\int \theta dt$, magnitude of the generated control action U). The stage is considered complete when a set of data describing the operation of the controller for all modes of its operation will be created for the automated object. The next step involves the use of the obtained statistical data for synthesizing the base of the control rules of the hybrid controller(s). The solution of this problem is possible in a manual mode, but the process is very labor-consuming, it is associated with a significant risk of errors, manifested in the creation of duplicate or, more critically contradictory, control rules. The identification of these errors may require the developer of great effort and does not guarantee a successful outcome. In this connection, the problem of developing and using specialized software becomes urgent, which was done in this work. As a result, the duration of the developer's time costs decreased by 98%, and the risk of errors was reduced to zero. For ease of use, the result of applying the proposed software is presented in the form of a *.fis file, which can be opened and analyzed in Fuzzy Logic Toolbox. In the future, the software application under consideration can be transferred from the MATLAB modeling environment to any other programming language.*

Automation; control; hybrid controller; software application; MATLAB; classical model; fuzzy model; fuzzy rule base.

Введение. Для решения задач управления технологическими процессами в настоящее время применяют различные типы регуляторов, среди которых особенно выделяются синтезированные с применением классической теории автоматического управления (ТАУ), такие как ПИ, ПД, ПИД. Данный тип регуляторов является наиболее распространенным, что обусловлено простотой реализации, внедрения и использования.

В качестве альтернативы классическим регуляторам выступают регуляторы, реализованные с применением методов искусственного интеллекта, а именно, аппарата нечеткой логики, искусственных нейронных и нейро-нечетких сетей [1].

Существуют примеры убедительно доказывающие, что применение одного типа регуляторов может быть более оправданно, чем другого в одном или нескольких режимах функционирования объекта управления (ОУ). Для остальных режимов работы ОУ другие типы регуляторов могут оказаться предпочтительнее. В результате для улучшения показателя качества управления необходимо одновременно использовать несколько различных регуляторов.

Такой подход согласуется с современными тенденциями синтеза систем автоматического управления (САУ), а получаемые в ходе его использования регуляторы называются гибридными. По мнению специалистов, гибридные регуляторы [2–5] являются перспективным инструментом решения задач управления трудно формализуемыми объектами, функционирующими в условиях неопределенности.

Одним из наиболее распространенных подходов к построению гибридных систем является подход, заключающийся в последовательном или параллельном включении нечеткого и классического регуляторов.

Анализ и современное состояние исследований по научной проблеме. Использование нечетких и классических регуляторов возможно несколькими способами, которые могут быть условно разделены на три основных группы:

- ◆ совместное [6];

- ◆ конкурентное;
- ◆ вспомогательное [7–13].

Совместное использование предполагает одновременное и равноправное применение классических и нечётких регуляторов. В результате управляющее воздействие формируется двумя регуляторами одновременно. Такой подход интересен, но не очень распространён на сегодняшний день.

То же самое справедливо и для конкурентного способа применения регуляторов, предполагающего организацию их некоторого соревнования за право формирования итогового управляющего воздействия.

Наиболее успешным и распространённым является вспомогательный способ использования регуляторов. Он предполагает выполнение вспомогательных действий одним регулятором для другого.

В работе [13] показан пример совместного использования нескольких регуляторов путем введения соответствующих весовых коэффициентов, формируемых методом нечеткого оценивания.

Примером вспомогательного использования регуляторов являются результаты работ [7–14].

В [5–13] нечеткие модели применяются для настройки коэффициентов ПИД-регуляторов при изменении параметров ОУ.

В [14] в качестве основного управляющего устройства используется классический ПИД регулятор, а в качестве компенсатора возмущающих воздействий – нечеткий контроллер.

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 синтеза гибридных (нечетких – ПИ) регуляторов, основанный на совместном использовании классической и нечеткой моделей, как показано на рис. 1.

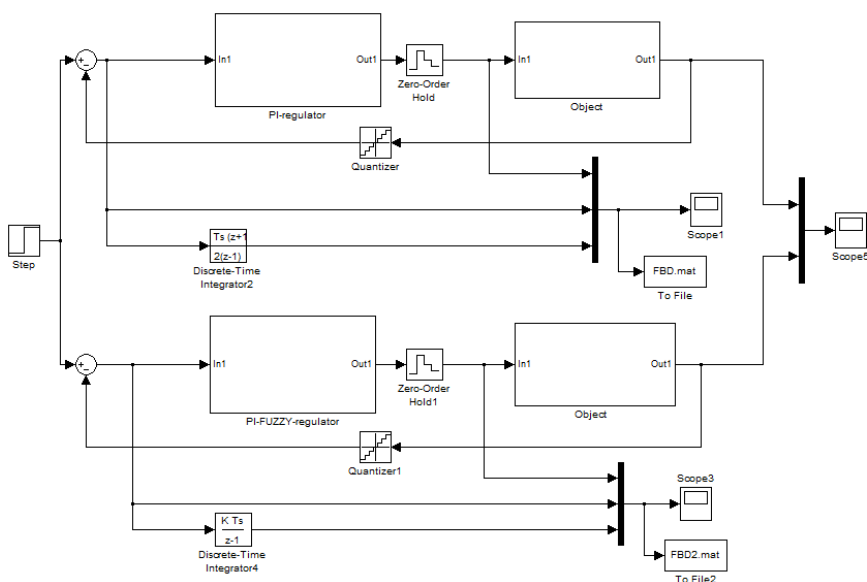


Рис. 1. Гибридная модель управления в MATLAB

Процесс синтеза гибридной системы делится на два этапа:

- ◆ сбор статистической информации о применении классического ПИ (ПИД, ПД) регулятора;
- ◆ использование специализированного программного обеспечения, автоматизирующего процесс формирования базы управляющих правил нечеткого – ПИ (ПИД, ПД) регулятора в соответствии с предложенным в работе [15] методом.

На первом этапе осуществляется сбор данных об использовании ПИ регулятора для управления некоторым ОУ. Полученная информация сохраняется в файл в виде текстового массива, как показано 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. Численные значения сигналов θ , $\int \theta dt$, U

Первые два столбца содержат данные о численных значениях входов ПИ регулятора (величина отклонения системы θ , интеграл отклонения $\int \theta dt$). Третий столбец содержит значения вырабатываемого ПИ регулятором управляющего воздействия U .

На втором этапе применяется специализированное программное обеспечение, разработанное в среде моделирования MATLAB и реализованное в соответствии с изложенной в работах [15–17] методиками. При этом получаемый нечеткий - ПИ (ПИД, ПД) регулятор менее зависим от знаний эксперта (а во многих задачах знания эксперта не требуются) [15].

Алгоритм работы программного обеспечения может быть выражен в виде простой последовательности шагов.

Шаг 1. Задание пользователем длин терм-множеств лингвистических переменных (количество используемых нечетких переменных).

Шаг 2. Задание пользователем числовых диапазонов изменения лингвистических переменных.

Шаг 3. Задание пользователем степени перекрытия нечетких переменных, как показано на рис. 3.

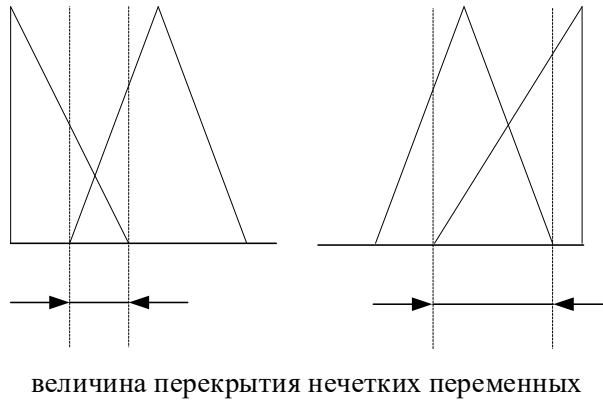


Рис. 3. Степень перекрытия нечетких переменных

Шаг 4. Автоматическая генерация терм-множеств лингвистических переменных нечеткого – ПИ регулятора. Результат выполнения данного шага показан на рис. 4.

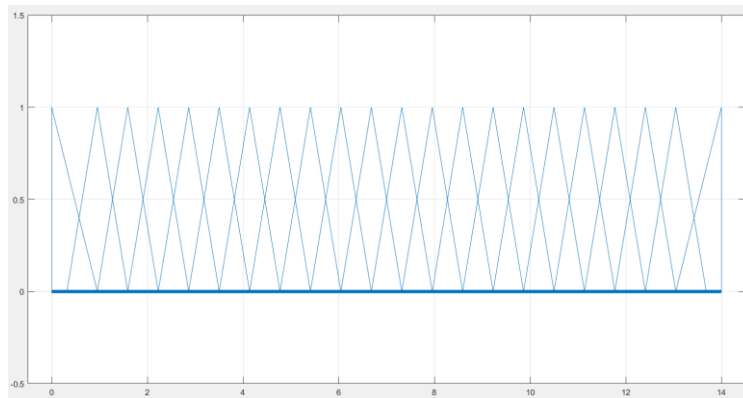


Рис. 4. Результат автоматической генерации терм-множества лингвистической переменной нечеткого ПИ-регулятора

Шаг 5. Чтение данных применения ПИ регулятора с последующим их сохранением в массив.

Шаг 6. Получение i -ой строки массива данных применения ПИ регулятора.

Шаг 7. Определение нечетких переменных, которым принадлежат численные значения θ , $\dot{\theta}dt$, U_i -ой строки массива данных применения ПИ регулятора, как показано на рис. 5.

Шаг 8. Генерация управляющих правил на основе номеров и количества нечетких переменных (в случае попадания численного значения одного из параметров θ , $\dot{\theta}dt$, U в две и более нечетких переменных происходит создание нескольких правил).

Шаг 9. Проверка наличия текущих правил в базе правил нечеткого - ПИ регулятора. В том случае, если дублирование не обнаружено выполняется добавление текущих правил, а базу правил нечеткого - ПИ регулятора. В противном случае правила заносятся в альтернативное хранилище.

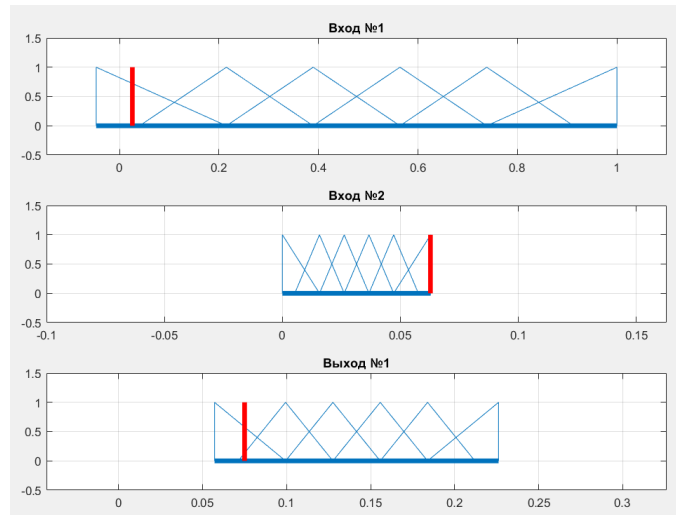


Рис. 5. Определение нечетких переменных, которым принадлежат численные значения θ , $\dot{\theta}dt$, U -ой строки массива данных применения ПИ (ПИД, ПД) регулятора

Шаг 11. Проверка завершения программы. Если проверка завершилась с отрицательным результатом, т.е. существуют еще необработанные статистически данные, то переходим к шагу 6.

Шаг 12. Сохранение параметров нечеткого – ПИ регулятора (термножества лингвистических переменных, базы управляющих правил) в файл нечеткой модели в *.fis.

Результаты визуализации сформированного нечеткого контроллера в редакторе Fuzzy Logic Toolbox MATLAB [18–20] представлены на рис. 6.

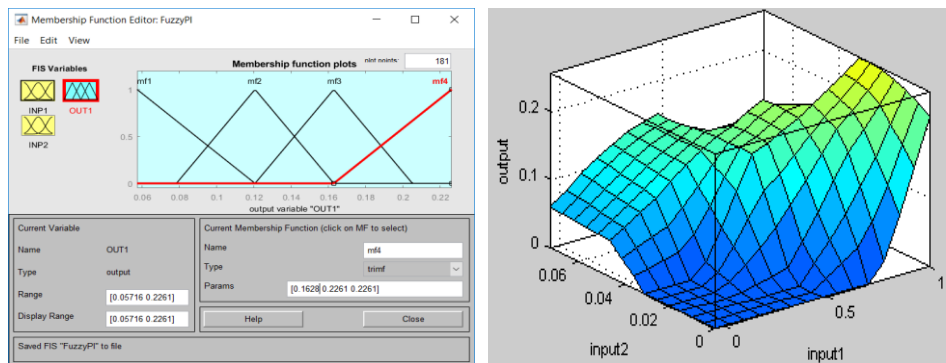


Рис. 6. Результаты визуализации сформированного нечеткого контроллера в редакторе Fuzzy Logic Toolbox MATLAB

Заключение. Применение предложенного программного обеспечения, реализующего идеи работы [15], автоматизирует процесс синтеза гибридных регуляторов, а именно нечеткого – ПИ (ПД, ПИД). Это свидетельствует об универсальности метода [15], возможности его широкого внедрения в различных сферах человеческой деятельности, где требуется замена классических систем автоматического управления.

Необходимость наличия предварительной информации о работе заменяемых регуляторов, используемой в качестве исходных данных программного обеспечения, не является ограничением его применения, т.к. получение требуемых данных на сегодняшний день не требует значительных экономических затрат.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Полковникова Н.А., Курейчик В.М.* Нейросетевые технологии, нечеткая кластеризация и генетические алгоритмы в экспертной системе СБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 7 (156). – С. 7-15.
2. *Колесников А.В.* Гибридные интеллектуальные системы: теория и технология разработки. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 600 с.
3. *Деменков Н.П.* Нечёткое управление в технических системах: учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 200 с.
4. *Леоненков А.В.* Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 736 с.
5. *Штовба С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
6. *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 23.06.2018).
7. *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.
8. *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.
9. *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.
10. *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.
11. *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.
12. *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 p.
13. *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.
14. *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.
15. *Игнатъев В.В., Спиридонов О.Б.* Гибридный алгоритм формирования базы правил нечеткого регулятора // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 11 (172). – С. 177-186.
16. *Игнатъев В.В., Курейчик В.М., Спиридонов О.Б., Игнатъева А.С.* Метод гибридного управления на основе адаптивной системы нейро-нечеткого вывода // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 9 (194). – С. 124-132.

17. *Игнатъев В.В., Спиридонов О.Б., Курейчик В.М., Ковалев А.В., Игнатъева А.С.* Метод гибридного управления в интеллектуальных системах на основе ПИД и ПИД-FUZZY-регуляторов // Вестник РГРТУ. – 2017. – № 62. – С. 110-118. – ISSN 1995-4565. – DOI: 10.21667/1995-4565-2017-62-4-110-118.
18. *Круглов 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., Круглов В.* Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.

REFERENCES

1. *Polkovnikova N.A., Kureychik V.M.* Neyrosetevye tekhnologii, nechetkaya klasterizatsiya i geneticheskie algoritmy v ekspertnoy sisteme SBIS [Neural network technologies, fuzzy clustering and genetic algorithms in the expert system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 7 (156), pp. 7-15.
2. *Kolesnikov A.V.* Gibridnye intellektual'nye sistemy: teoriya i tekhnologiya razrabotki [Hybrid intelligent systems: theory and technology of development]. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGTU, 2001, 600 p.
3. *Demenkov N.P.* Nchetkoe upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh: uchebnoe posobie [Fuzzy control in technical systems: a training manual]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2005, 200 p.
4. *Leonenkov A.V.* Nchetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH [Fuzzy modeling in the MATLAB and fuzzyTECH environment]. Saint Petersburg: BKhV – Peterburg, 2005, 736 p.
5. *Shtovba S.D.* Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB [Designing of fuzzy systems by means of MATLAB]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2007, 288 p.
6. *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 June 2018).
7. *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.
8. *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.
9. *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.
10. *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.
11. *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.
12. *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 p.
13. *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.
14. *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.
15. *Ignat'ev V.V., Spiridonov O.B.* Gibridnyy algoritm formirovaniya bazy pravil nechetkogo regulatora [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.
16. *Ignat'ev V.V., Kureychik V.M., Spiridonov O.B., Ignat'eva A.S.* Metod gibridnogo upravleniya na osnove adaptivnoy sistemy neyronechetkogo vyvoda [Method of hybrid control based on the adaptive system of neuro-fuzzy inference], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 9 (194), pp. 124-132.

17. *Ignat'ev V.V., Spiridonov O.B., Kureychik V.M., Kovalev A.V., Ignat'eva A.S.* Metod gibridnogo upravleniya v intellektual'nykh sistemakh na osnove PID i PID-FUZZY-regulyatorov [Method of hybrid control in intelligent systems based on PID and PID-FUZZY-controllers], *Vestnik RGRU* [Vestnik RSRTU], 2017, No. 62, pp. 110-118. ISSN 1995-4565. DOI: 10.21667/1995-4565-2017-62-4-110-118.
18. *Kruglov V.V., Dli M.I., Golubov R.Yu.* Nechetkaya logika i iskusstvennye neyronnye seti [Fuzzy logic and artificial neural networks]. Moscow, 2004, 224 p.
19. *D'yakonov V.* MATLAB: uchebnyy kurs [MATLAB: training course]. Saint 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]. Sait Petersburg: Piter, 2001, 480 p.

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

Игнат'ев 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.: 88634328099; научно-конструкторское бюро моделирующих и управляющих систем; директор; к.т.н.

Белоглазов Денис Александрович – e-mail: d.beloglazov@gmail.com; 347922, г. Таганрог, ул. Энгельса 1; тел.: +78634371689; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.

Курейчик Виктор Михайлович – e-mail: vmkureychik@sfedu.ru; тел.: 88634371651; кафедра систем автоматизированного проектирования; д.т.н.; профессор.

Игнат'ева 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: 88634328099; Design Bureau of Modelling and Controlling Systems; director; cand. of eng. sc.

Beloglazov Denis Aleksandrovich – e-mail: d.beloglazov@gmail.com; 347922, 1, Engelsa st., Taganrog, Russia; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc..

Kureychik Viktor Mikhailovich – e-mail:vmkureychik@sfedu.ru; phone: 88634371651; the department of computer aided design systems; dr. of eng. sc.; professor.

Ignatyeva Alexandra Sergeevna – e-mail: alexandra_25@mail.ru; phone: 89281377115; the department of computer aided design systems; graduate student.

УДК 551.46.077:629.584

DOI 10.23683/2311-3103-2018-3-185-197

Л.В. Киселев, А.В. Медведев

ТРАЕКТОРНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ ГРУППОЙ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ

Инспекция (патрулирование) границ морских акваторий входит в число одной из основных задач при оперативном мониторинге водной среды и морского дна в охраняемых территориях. При обследовании больших областей группа автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) работает по единому сценарию. Задача состоит в организации движения АНПА вдоль границы и наблюдении полводной обстановки. Решение задачи зави-