

УДК 004.896

В.В. Игнатъев, О.Б. Спиридонов

ГИБРИДНЫЙ АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗЫ ПРАВИЛ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Приводятся результаты взаимодействия классического и нечеткого регуляторов автоматизированной системы управления. За основу взяты классический ПИД-регулятор и нечеткий регулятор, база правил которого может быть сформирована в автоматическом режиме. Рассмотрен стандартный алгоритм нечеткого вывода Мамдани, на основе которого предложен гибридный алгоритм формирования базы правил нечеткого регулятора, позволяющий получать желаемое управление в зависимости от степени сложности решаемых задач. Ключевым отличием предлагаемого гибридного алгоритма является изменение основных этапов нечеткого вывода, реализуемых в стандартном алгоритме Мамдани, в частности, первым этапом является этап фаззификации, вторым – этап формирования базы правил нечеткого регулятора. Таким образом, на вход нечеткого регулятора поступает информация, которая представляет собой измеренные выходные величины, получаемые непрерывно в процессе работы системы управления с классическим регулятором. Приведена структурная схема гибридной системы управления для разрабатываемого алгоритма. Построенная нечеткая модель управления на основе гибридного алгоритма менее зависима от знаний эксперта в предметной области и использует в качестве знаний такие переменные как отклонение системы, скорость изменения отклонения и управляющее воздействие на объект, полученные при моделировании системы с применением классического регулятора. При этом для синтеза ПИД-нечеткого регулятора достаточно только двух входных переменных и одной выходной. Графически продемонстрирован принцип работы разработанного алгоритма, в графическом редакторе FIS показана работа нечеткой модели управления на основе гибридного алгоритма с общим логическим выводом в четыре этапа (фаззификации, нечеткого вывода, композиции, дефаззификации).

Автоматизированные системы управления; гибридный алгоритм; классический регулятор; нечеткий регулятор; база нечетких правил.

V.V. Ignatyev, O.B. Spiridonov

HYBRID ALGORITHM OF FORMATION OF BASE OF RULES OF FUZZY REGULATOR

The Results of interaction between classical and fuzzy regulators of an automated control system are given in work. The classical PID-regulator and the fuzzy regulator which base of rules can be created in the automatic mode are taken as a basis. The standard algorithm of fuzzy conclusion of Mamdani on the basis of which the hybrid algorithm of formation of base of rules of fuzzy regulator allowing to receive desirable control depending on degree of complexity of the solved tasks is offered is considered. Key difference of the offered hybrid algorithm is change of the main stages of fuzzy conclusion realized in standard algorithm of Mamdani, in particular, the first stage is the fuzzification stage, the second – a stage of formation of base of rules of fuzzy regulator. Thus, the input of the fuzzy regulator receives information, which represents the measured output values are obtained continuously during work of the control system with a classic regulator. The block diagram of a hybrid control system for the developed algorithm is provided. The constructed fuzzy control model on the basis of hybrid algorithm is less dependent on expert knowledge in the subject area and uses as knowledge such variables as a deviation of system, speed of change of a deviation and the control action on the object obtained in the simulation using the classic regulator. Thus for synthesis fuzzy PID controller it is enough only two input variables and one output. The principle of work of the developed algorithm is graphically shown. Work of fuzzy control model on the basis of hybrid algorithm with the general logical conclusion in four stages (fuzzification, fuzzy output, composition, defuzzification) is shown in the graphic FIS editor.

Control systems; hybrid algorithm; classical regulator; fuzzy regulator; base of fuzzy rules.

Введение. Управление различными процессами и их параметрами является главной областью применения регулирующих устройств. Техника регулирования является важнейшей областью традиционной техники управления и автоматизации, в которых все чаще применяются гибридные системы управления, представляющие собой совокупность двух, записанных на математическом или программном языке [1–3] автономных методов.

Выбор регулятора по виду используемой энергии определяется характером объекта регулирования и особенностями автоматической системы. По назначению регуляторы подразделяются на специализированные и универсальные с нормированными входными и выходными сигналами и пригодные для управления различными параметрами.

Стандартный алгоритм нечёткого вывода Мамдани, предложенный в 1975 г. английским математиком Е. Мамдани [4–6] в качестве метода для управления паровым двигателем, получил наибольшее применение в системах нечёткого вывода. Формально алгоритм Мамдани может быть определен следующим образом:

- ◆ формирование базы правил систем нечёткого вывода;
- ◆ процедура фаззификации (введение нечёткости) входных переменных. Каждому значению отдельной входной переменной ставится в соответствие значение функции принадлежности соответствующего ей терма входной лингвистической переменной – $\mu^1(x), \mu^2(x), \dots, \mu^n(x)$, где $\mu^1(x), \dots, \mu^n(x)$ – функции принадлежности для переменной x ;
- ◆ нечёткий вывод или нахождение степеней истинности (уровней «отсечки») для предпосылок («Condition №1», «Condition №2», ..., «Condition №N») каждого из правил. Процедура нахождения степеней истинности также называется агрегированием;
- ◆ процедура активизации, т.е. нахождение усечённой функции принадлежности для выходной переменной. Для этой цели можно использовать один из модифицированных методов нечёткой композиции [7–13]:
 - *min – активация:* $\mu'(y) = \min\{c_i, \mu(y)\}$;
 - *prod – активация:* $\mu'(y) = c_i \cdot \mu(y)$;
 - *average – активация:* $\mu'(y) = 0,5(c_i + \mu(y))$.

В приведённых методах множество $C = (c_1, c_2, \dots, c_q)$ – множество степеней истинности для каждого из правил; q – общее количество подзаключений («Conclusion №1», «Conclusion №2», ..., «Conclusion №N») в базе правил; $\mu(x)$ – функция принадлежности терма, который является значением некоторой выходной переменной из универсума Y ;

- ◆ композиция (процедура аккумуляции) или объединение найденных усечённых функций с целью получения итогового нечёткого множества для выходной переменной и результирующей функции принадлежности;
- ◆ процедура дефаззификации (приведение к чёткости) выходных переменных. На этапе дефаззификации может быть применён метод центра тяжести или метод биссектрисы площади.

Гибридный алгоритм формирования базы правил нечеткого регулятора. Предлагаемый алгоритм позволяет получать желаемое управление в зависимости от степени сложности решаемых задач. Модель управления на основе гибридного алгоритма менее зависима от знаний эксперта (а во многих задачах знания эксперта не требуются) [14–16].

В качестве знаний могут быть использованы полученные при моделировании классической системы следующие переменные (рис. 1): отклонение системы θ , скорость изменения отклонения $\dot{\theta}$, управляющее воздействие U на объект.

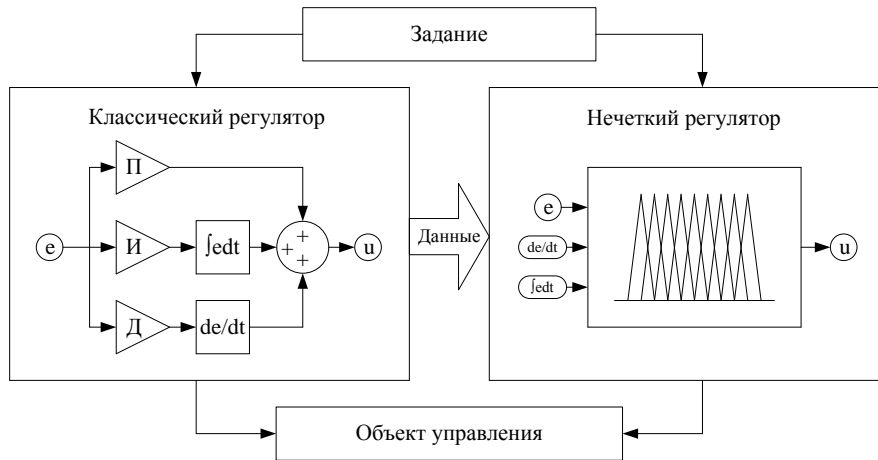


Рис. 1. Структурная схема гибридной системы управления

Алгоритм работы представленной системы включает в себя следующие этапы:

П. 1. Математический расчёт параметров объекта управления.

П. 2. Математический расчёт параметров классического регулятора.

П. 3. Синтез классической модели управления и анализ основных показателей качества переходного процесса.

П. 4. Выбор переменных θ , $\dot{\theta}$, U , необходимых для синтеза нечёткой модели. Перечисленные переменные в процессе моделирования классической системы определяются в дискретные моменты времени t_i от начала своего изменения t_0 до времени установившегося режима t_k и преобразуются в табличные значения t_r . Таким образом, определяется исследуемый диапазон изменения каждой величины θ , $\dot{\theta}$, включая управляющее воздействие U .

П. 5. Синтез нечёткой модели управления, входными переменными которого являются θ , $\dot{\theta}$, а выходной переменной U .

П. 6. Выбор функций принадлежности с соответствующими термножествами для каждой из входных и выходной лингвистических переменных, определение их форм и количества. Для повышения адекватности модели количество термов выходной лингвистической переменной должно быть больше количества термов входных лингвистических переменных.

Автоматически, после построения функций принадлежности на определенном при реализации в классической модели диапазоне, получаем их параметры.

П. 7. Сравнение табличных значений величин θ , $\dot{\theta}$, U с полученными параметрами термов (например, d_1 , d_2) графически представлено на рис. 2.

В результате сравнения, каждому табличному значению t_r , каждой выбранной из набора θ (сигнал отклонения), $\dot{\theta}$ (дифференциал отклонения), U (управляющее воздействие) величины ставится в соответствие значение функции принадлежности $\mu(x)$ в диапазоне [0–1] по методу *min* или *max*, в зависимости от требований к процессу регулирования (метод *max* позволяет получить более качественный переходной процесс).

Таким образом, определяется степень принадлежности значения t_r терму лингвистической переменной.

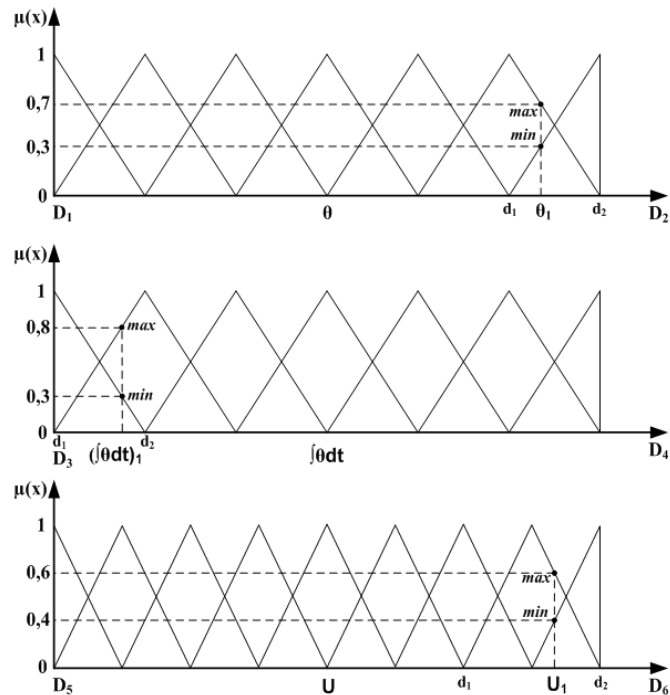


Рис. 2. Сравнение табличных значений величин θ , $\dot{\theta}$, U с полученными параметрами термов

П. 8. Формирование базы правил нечетких продукций после определения входных лингвистических переменных с соответствующими терм-множествами в виде $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n\}$, $\dot{\theta} = \{\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dots, \dot{\theta}_n\}$ и выходной лингвистической переменной с терм-множеством в виде $U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_n\}$.

П. 9. Моделирование системы с построением поверхности нечеткого вывода, позволяющей установить зависимость значений выходной переменной от значений входных переменных нечеткой модели. Установление данной зависимости является, по сути, решением задачи, известной в классической теории управления как задача синтеза управляющих воздействий.

П. 10. Анализ основных показателей качества переходного процесса полученной нечеткой модели.

П. 11. Корректировка базы правил нечеткого регулятора для достижения желаемого переходного процесса.

Анализ зависимостей выходной переменной от значений входных переменных нечеткой модели может служить основанием для изменения нечетких правил или изменения диапазона выходной лингвистической переменной с целью повышения адекватности системы нечеткого вывода для решения конкретных задач в системах автоматического управления.

Таким образом, применив в качестве алгоритма нечеткого вывода алгоритм Мамдани, предлагается изменить основные этапы нечеткого вывода, в частности, первым этапом является этап фаззификации, вторым – этап формирования базы правил.

Нечеткая модель управления с использованием системы нечеткого вывода на основе измененного алгоритма Мамдани. На вход нечеткой системы управления поступает информация, которая представляет собой измеренные вход-

ные величины (переменные) [13–18]. Информация, формирующаяся на выходе системы, является выходными управляющими переменными. Общий логический вывод осуществляется в четыре этапа, показанных на рис. 3.

На первом этапе происходит определение (введение) нечёткости. В блоке фаззификации каждому конкретному значению отдельной входной переменной системы нечёткого управления ставится в соответствие значение функции принадлежности соответствующего ей термина входной лингвистической переменной.

После завершения этого этапа для всех входных переменных определяются конкретные значения функций принадлежности по каждому из лингвистических термов, которые используются в условиях базы правил системы нечёткого вывода.

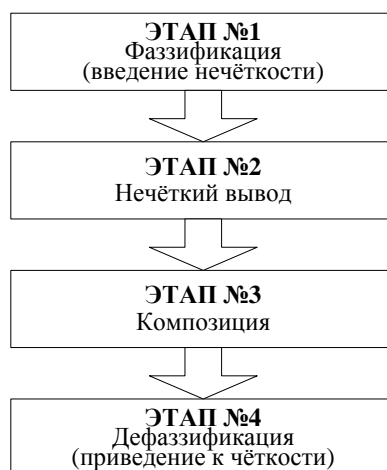


Рис. 3. Общий логический вывод

На втором этапе в блоке нечёткого вывода на основе сформированной базы правил записываются лингвистические правила вида ЕСЛИ, ТО. Взаимодействие между входными и выходными функциями принадлежности вида «ЕСЛИ → ТО» обозначается как логическая связка или импликация [7, 13].

Формирование базы правил предназначено для наглядного представления экспертных знаний в рассматриваемой области. Нечёткий вывод реализован на основе нечётких продукционных правил. Под правилом нечёткой продукции понимается выражение следующего вида [7, 9, 11, 13]:

$$(i): Q, P, A \Rightarrow B, S, F, N, \quad (2)$$

где (i) – имя нечёткой продукции; Q – сфера применения нечёткой продукции; P – условие применимости ядра нечёткой продукции; $A \Rightarrow B$ – ядро нечёткой продукции, в котором A – условие ядра; B – заключение ядра; « \Rightarrow » – знак логического следования; S – метод определения количественного значения степени истинности заключения ядра; F – коэффициент определенности нечёткой продукции; N – постусловия продукции.

Центральным компонентом нечёткой продукции является ядро $A \Rightarrow B$, которое записывается в следующем виде:

$$\langle \text{ЕСЛИ } A, \text{ ТО } B \rangle \text{ или } \langle \text{IF } A, \text{ THEN } B \rangle,$$

где A, B являются некоторыми выражениями нечёткой логики.

Множество правил нечётких продукций в виде «IF A, THEN B» составляют продукционную нечёткую систему, которая может быть записана в виде структурированного текста:

ПРАВИЛО № 1: ЕСЛИ «Предпосылка №1», ТО «Заключение №1»

ПРАВИЛО № 2: ЕСЛИ «Предпосылка №2», ТО «Заключение №2»



ПРАВИЛО № N: ЕСЛИ «Предпосылка №N», ТО «Заключение №N»

(3)

Таким образом, для формирования базы правил нечётких продукций необходимо определить множество правил нечётких продукций в форме (3), а также множество входных и выходных лингвистических переменных. Для задания термов входных и выходных лингвистических переменных применяют специальные сокращения.

На третьем этапе – этапе композиции – полученные нечёткие подмножества (усечённые по высоте функции принадлежности) объединяются вместе для формирования одного нечёткого подмножества (результатирующей функции принадлежности) для переменной вывода (решения). Для объединения обычно используются операции «*max*» (максимум) или «*sum*» (сумма).

При композиции «*max*» результирующее нечёткое подмножество конструируется как поточечный максимум по всем полученным нечётким подмножествам (нечёткая логика «ИЛИ»). При композиции «*sum*» результирующее нечёткое подмножество конструируется как поточечная сумма по всем полученным нечётким подмножествам.

На четвёртом этапе в блоке дефаззификации нечёткий набор выводов преобразуется в чёткое число, т.е. для каждой выходной лингвистической переменной ставится в соответствие обычное количественное значение. Этап дефаззификации считается законченным, когда для каждой из выходных лингвистических переменных определены итоговые количественные значения в форме некоторого действительного числа. Визуализация разработанной нечеткой модели управления с применением гибридного алгоритма показана на следующем рисунке.

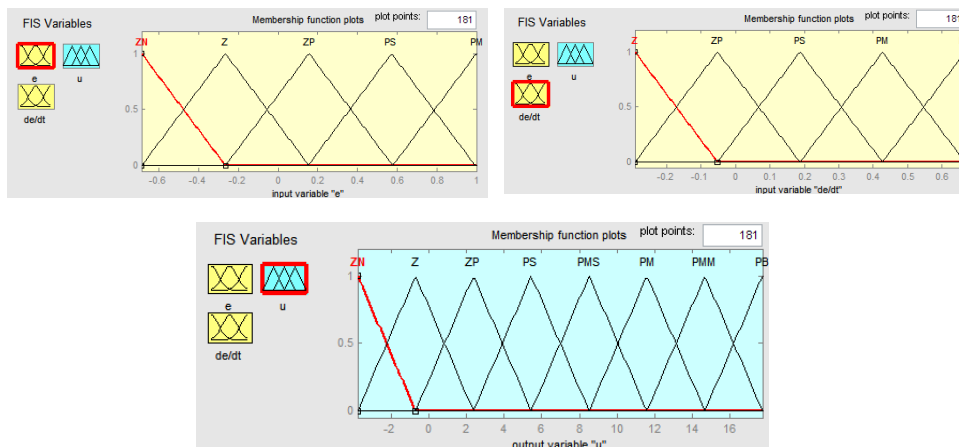


Рис. 4. Термы лингвистической переменной «Сигнал отклонения», «Дифференциал отклонения», «Управляющее воздействие»

Лингвистические переменные определяются следующими терм-множествами:

- ◆ первая лингвистическая переменная «Сигнал отклонения» определяется терм-множеством $T_1 = \{ZN, Z, ZP, PS, PM\}$;
- ◆ вторая лингвистическая переменная «Дифференциал отклонения» определяется терм-множеством $T_2 = \{Z, ZP, PS, PM, PB\}$;

- ♦ выходная лингвистическая переменная «Управляющее воздействие» определяется терм-множеством $T_3 = \{ZN, Z, ZP, PS, PMS, PM, PMM, PB\}$.

После завершения всех этапов разработки нечеткой системы при помощи возможностей графического редактора FIS [19–20] получаем модель нечеткого вывода (рис. 5).

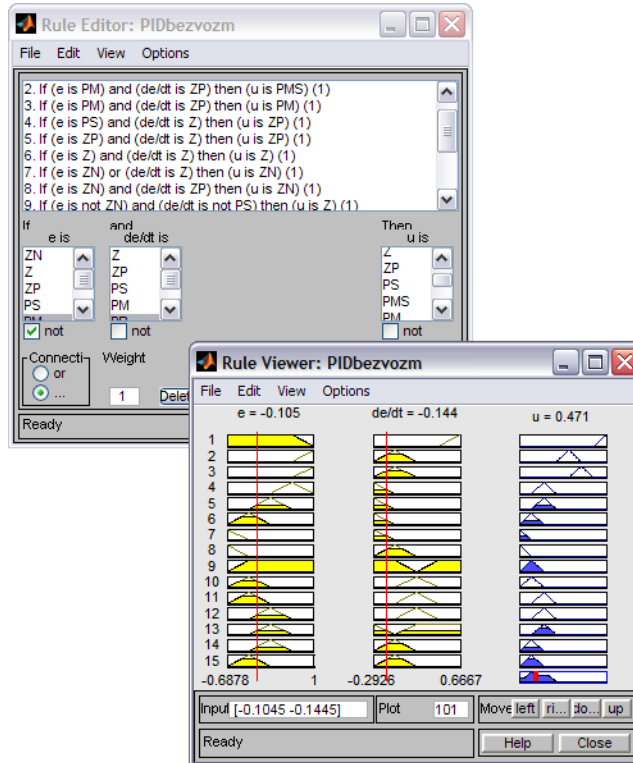


Рис. 5. Работа нечеткой модели на основе гибридного алгоритма

Выводы. Полученная модель нечеткого вывода с применением гибридного алгоритма формирования базы правил нечеткого регулятора позволяет:

- ♦ избежать ошибок, связанных с человеческим фактором при решении задач управления сложными технологическими процессами;
- ♦ обеспечить высокое качество управления при изменении параметров объекта;
- ♦ сократить количество нечетких правил;
- ♦ создавать гибридные системы с нечетким управлением, обладающие повышенной робастностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесников А.В. Гибридные интеллектуальные системы: теория и технология разработки. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 600 с.
2. Гаврилов А.В., Новицкая Ю.В. Гибридные интеллектуальные системы. – Новосибирск: НГТУ, 2006.
3. Игнатьев В.В., Финаев В.И. Система автоматизированного управления креслом водителя автомобиля // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: материалы 14-й Международной научно-технической конференции. – М.: МЭИ, 2008.
4. Herrmann C. A hybrid fuzzy-neural expert system for diagnosis // Proc. of IJCAI. Montreal. – 1995. – P. 1-10.

5. *Mamdani E.H.* Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis // *IEEE Transactions on Computers*. – 1977. – Vol. 26, No. 12. – P. 1182-1191.
6. *Mamdani E.H.* Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers // *International Journal of Man-Machine Studies*. – 1976. – Vol. 8. – P. 669-678.
7. *Леоненков А.В.* Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 736 с.
8. *Ross T.J.* Fuzzy logic with engineering applications // McGraw-Hill. – 1995. – 600 p.
9. *Гостев В.И.* Нечёткие регуляторы в системах автоматического управления. – Киев: Радиоаматор, 2008. – 972 с.
10. *Круглов В.В., Дли М.И., Голубов Р.Ю.* Нечёткая логика и искусственные нейронные сети. – М., 2004. – 224 с.
11. *Деменков Н.П.* Нечёткое управление в технических системах: учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 200 с. – ISBN 5-7038-2742-6.
12. *Russell S.J., Norvig P.* Artificial Intelligence. A Modern Approach. – Prentice Hall, 2009. – 3 ed. – 1152 с. – ISBN-10: 0136042597.
13. *Поспелов Д.А.* Продукционные модели. В кн. Искусственный интеллект. – В 3-х кн. Кн. 2. Модели и методы: справочник / под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Радио и связь, 1990. – С. 49-56.
14. *Игнатъев 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. – S. 54-57. – ISBN 978-966-8736-05-6.
15. *Ignatyev V.V., Kobersy I.S., Shapovalov I.O.* 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. – ISBN 978-966-8736-05-6.
16. *Ignatyev V.V., Finaev V.I.* The use of hybrid regulator in design of control systems // *World Applied Sciences Journal*. – 2013. – No. 23 (10). – P. 1291-1297, ISSN 1818-4952 © IDOSI Publications, 2013 DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.10.13144.
17. *Ignatyev V.V., Zargaryan Yu.A., Zargaryan E.V., Spiridonov O.B., Shestova E.A., Finaev V.I.* Multi-criteria optimization of the operation of control systems of moving object under uncertainty // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. – September 2015. – Vol. 10, No. 16. – P. 6811-6816. – ISSN 1819-6608.
18. *Ignatyev V.V., Finaev V.I., Shestova E.A., Spiridonov O.B., Zargaryan J.A., Zargaryan E.V.* Optimum nominal method modification at the management of moving objects under uncertainty // *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. – September 2015. – Vol. 10, No. 16. – P. 6837-6844. – ISSN 1819-6608.
19. *Дьяконов В., Круглов В.* Математические пакеты расширения MATLAB: специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.
20. *Гостев В.И.* Системы управления с цифровыми регуляторами: справочник. – Киев: Техника, 1990. – С. 276-278.

REFERENCES

1. *Kolesnikov A.V.* Gibrnidnye intellektual'nye sistemy: teoriya i tekhnologiya razrabotki [Hybrid intelligent systems: theory and technology development]. St. Petersburg: Izd-vo SPbGTU, 2001, 600 p.
2. *Gavrilov A.V., Novitskaya Yu.V.* Gibrnidnye intellektual'nye sistemy [Hybrid intelligent systems]. Novosibirsk: NGTU, 2006.
3. *Ignat'ev V.V., Finaev V.I.* Sistema avtomatizirovannogo upravleniya kreslom voditelya avtomobilya [Automatic control system of the driver's seat of car], *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: materialy 14-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoj konferentsii* [Radio Electronics, electrical engineering and energy: proceedings of the 14th international scientific and technical conference]. Moscow: MEI, 2008.
4. *Herrmann C.* A hybrid fuzzy-neural expert system for diagnosis, *Proc. of IJCAI. Montreal*, 1995, pp. 1-10.
5. *Mamdani E.H.* Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis, *IEEE Transactions on Computers*, 1977, Vol. 26, No. 12, pp. 1182-1191.

6. *Mamdani E.H.* Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers, *International Journal of Man-Machine Studies*, 1976, Vol. 8, pp. 669-678.
7. *Leonenkov A.V.* Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH]. St. Petersburg: BKhV – Peterburg, 2005, 736 p.
8. *Ross T.J.* Fuzzy logic with engineering applications, *McGraw-Hill*, 1995, 600 p.
9. *Gostev V.I.* Nechetkie regulatory v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya [Fuzzy controllers in automatic control systems]. Kiev: Radioamator, 2008, 972 p.
10. *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.
11. *Demenev N.P.* Nechetkoe upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh: uchebnoe posobie [Fuzzy control in technical systems: textbook]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2005, 200 p. ISBN 5-7038-2742-6.
12. *Russell S.J., Norvig P.* Artificial Intelligence. A Modern Approach. Prentice Hall, 2009. 3 ed., 1152 p. ISBN-10: 0136042597.
13. *Pospelov D.A.* Produktsionnye modeli. V kn. Iskusstvennyy intellect [A production model. In the book Artificial intelligence]. In 3 books. Book 2. Modeli i metody: Spravochnik [Models and methods: Handbook], Ed. by Pospelova D.A. Moscow: Radio i svyaz', 1990, pp. 49-56.
14. *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 the integration of classical and fuzzy models of the object], *Materiály VIII Mezinárodní vědecko-praktická konference «Dny vědy – 2012»*. – Dil 94. *Technické vědy: Praha. Publishing House «Education and Science» s.r.o.*, pp. 54-57. ISBN 978-966-8736-05-6.
15. *Ignatyev V.V., Kobersy I.S., Shapovalov I.O.* Fuzzy control system in an automatic and automated production, *Материали за 9-а Международна научна практична конференция, «Ключови въпроси в съвременната наука», 2013* [Materials 9-international scientific-practical conference "Key issues in modern science", 2013. Vol. 36. *Tekhnologii [Technology]*. Sofia. «Byal GRAD-BG» OOD, pp. 41-43. ISBN 978-966-8736-05-6.
16. *Ignatyev V.V., Finaev V.I.* The use of hybrid regulator in design of control systems, *World Applied Sciences Journal*, 2013, No. 23 (10), pp. 1291-1297. ISSN 1818-4952 © IDOSI Publications, 2013 DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.10.13144.
17. *Ignatyev V.V., Zargaryan Yu.A., Zargaryan E.V., Spiridonov O.B., Shestova E.A., Finaev V.I.* Multi-criteria optimization of the operation of control systems of moving object under uncertainty, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, September 2015, Vol. 10, No. 16, pp. 6811-6816. ISSN 1819-6608.
18. *Ignatyev V.V., Finaev V.I., Shestova E.A., Spiridonov O.B., Zargaryan J.A., Zargaryan E.V.* Optimum nominal method modification at the management of moving objects under uncertainty, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, September 2015, Vol. 10, No. 16, pp. 6837-6844. ISSN 1819-6608.
19. *D'yakonov V., Kruglov V.* Matematicheskie pakety rasshireniya MATLAB: spetsial'nyy spravochnik [Mathematical expansion packs MATLAB: a special guide]. St. Petersburg: Piter, 2001, 480 p.
20. *Gostev V.I.* Sistemy upravleniya s tsifrovymi regulyatorami: spravochnik [Control systems with digital controllers: a Handbook]. Kiev: Tekhnika, 1990, pp. 276-278.

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.

Спирidonov Олег Борисович – e-mail: oleg.spiridonov@mail.ru; тел.: 88634328099; научно-конструкторское бюро моделирующих и управляющих систем; директор.

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.

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