

18. *Maffezzoni P.A.* Versatile Time-Domain Approach to Simulate Oscillators in RF Circuits, *IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Regular Papers*, 2009, Vol. 56, No. 3, pp. 594-603.
19. *Biryukov V.N., Pilipenko A.M.* Analiz pogreshnosti chislennogo modelirovaniya avtogeneratorov vo vremennoy oblasti [Analysis of the error of oscillator's numerical simulation in the time domain], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 11 (160), pp. 119-127.
20. *Biryukov V.N., Pilipenko A.M.* An Approach to Estimate the Error of Oscillator Time-Domain Analysis, *Proceedings of IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS)*, 2013, pp. 223-226.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.В. Демьяненко.

**Пилипенко Александр Михайлович** – Южный федеральный университет; e-mail: ampilipenko@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; зав. кафедрой; к.т.н.

**Агабекян Артём Вячеславович** – e-mail: artyom.agabekyan@mail.ru; кафедра теоретических основ радиотехники; студент.

**Pilipenko Alexandr Mikhaylovich** – Southern Federal University; e-mail: ampilipenko@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamentals of radio engineering; cand. of eng. sc.; head of the department.

**Agabekyan Artyom Vyacheslavovich** – e-mail: artyom.agabekyan@mail.ru; the department of fundamentals of radio engineering; student.

УДК 303.717

DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-254-262

**А. Аль-Шамки, В.В. Шадрина, В.Г. Галалу**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБРИДНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ**

*Одной из самых распространенных технологических операций является сварка отдельных деталей и блоков. Сварка находит широкое применение в судостроении, авиационной, оборонной и химической промышленности, при строительстве нефте- и газопроводов. При этом к качеству сварного шва предъявляются весьма жесткие требования по прочности, отсутствию пустот и каверн, работоспособности при высоких давлениях (до 100 кг/см<sup>2</sup>) и в широком диапазоне температур ( $\pm 50^\circ\text{C}$ ). Наиболее полно этим требованиям соответствует плазменная (аргоновая) сварка. Выполнен краткий аналитический обзор по теме исследования. Показано, что перспективным направлением развития систем управления плазменной сваркой является применение гибридных регуляторов, созданных на основе классических методов автоматического управления и нечетком регулировании, формализующем усредненные знания экспертов. Нечеткий компонент (знание экспертов) должен быть доступен для быстрого и простого ввода в регулятор. Была разработана структурная схема и модель одного канала гибридного регулятора в среде Matlab Simulink. Моделировался канал управления силой тока с использованием нечеткого регулятора из библиотеки Fuzzy Logic, с применением алгоритма нечеткого вывода Мамдани. Задавалось 19 вариантов лингвистических и нечетких переменных, была получена поверхность функции принадлежности переменных. Следует отметить возможность быстрого ввода лингвистических оценок экспертов в память гибридного регулятора. Анализировалось поведение моделей гибридного регулятора и стандартных ПИ и ПИД-регуляторов при единичном ступенчатом воздействии. Гибридный регулятор обеспечивает существенно лучшие показатели качества (в 2,5-3 раза), чем стандартные регуляторы. Гибридный регулятор выходит на установившийся режим через 6с, ПИД-регулятор – через 13с, ПИ-регулятор – через 15с, причем стандартные регуляторы имеют*

*перерегулирование (первый выброс) до 50%. Таким образом показана реальная возможность построения нечёткого гибридного регулятора с заданными характеристиками. Возможна реализация гибридного регулятора в виде ПЛИС.*

*Плазменная сварка; эксперимент; параметры; моделирование; гибридный регулятор; знания экспертов.*

**A. Al-Shamki, V.V. Shadrina, V.G. Galalu**

### **SIMULATION OF A HYBRID CONTROLLER FOR CONTROLLING PLASMA WELDING PARAMETERS**

*One of the most common technological operations is welding of individual parts and blocks. Welding is widely used in shipbuilding, aviation, defense and chemical industries, in the construction of oil and gas pipelines. At the same time, very strict requirements are imposed on the quality of the weld in terms of strength, absence of voids and cavities, operability at high pressures (up to 100 kGf/cm<sup>2</sup>) and in a wide temperature range ( $\pm 50^\circ\text{C}$ ). Plasma (argon) welding meets these requirements most fully. A brief analytical review on the research topic was carried out. It is shown that a promising direction for the development of plasma welding control systems is the use of hybrid regulators created on the basis of classical automatic control methods and fuzzy control, formalizing the average knowledge of experts. The fuzzy component (expert knowledge) should be available for quick and easy input into the controller. A block diagram and a model of a single channel of a hybrid controller was developed in the Matlab Simulink environment. The current control channel was modeled using a fuzzy controller from the Fuzzy Logic library, using the Mamdani fuzzy output algorithm. 19 variants of linguistic and fuzzy variables were set, the surface of the variable membership function was obtained. It should be noted that it is possible to quickly enter linguistic assessments of experts into the memory of the hybrid controller. The behavior of hybrid controller models and standard PI and PID controllers under a single step action was analyzed. The hybrid regulator provides significantly better quality indicators (2.5-3 times) than standard regulators. The hybrid controller enters the steady-state mode after 6s, the PID controller – after 13s, the PI controller - after 15s, and the standard regulators have an overshoot (first emission) of up to 50%. Thus, the real possibility of constructing a fuzzy hybrid controller with specified characteristics is shown. It is possible to implement a hybrid controller in the form of an FPGA.*

*Plasma welding; experiment; parameters; simulation; hybrid regulator; expert knowledge.*

**Введение.** Электрическая сварка находит широкое применение во многих отраслях народного хозяйства Российской Федерации, в частности в судостроении, при производстве железнодорожных вагонов и цистерн, в строительстве, в авиационном и ракетном строительстве и ракетной технике [1, 2]. При этом к качеству сварных изделий предъявляются очень жёсткие требования по прочности сварных конструкций, герметичности, возможности работы в широком диапазоне температур и т.д. Например, при строительстве газопровода «Северный поток -2» было уложено более 100 000 труб длиной 12м и толщиной стенок 21мм, каждый стык проходил тщательный ультразвуковой и рентгеновский контроль, внутренняя поверхность сварного шва полировалась, так как транспортировка газа происходит при давлении до 100 атмосфер и скорости газового потока до 300 км/час [3]. Ещё более жесткие требования предъявляются к военной и космической технике, при сварке прочного корпуса подводных лодок и т.д. Объем сварочных работ в РФ достаточно большой и непрерывно увеличивается, в первую очередь для нужд нефтегазовой сферы и оборонной промышленности, где предъявляются весьма жесткие требования к качеству сварных швов и прочности сварных соединений. Основным критерием сварки можно назвать качество сварного шва [2, 3], но понятие «качество сварного шва» является вербальным и его рассматривают, как совокупность локальных критериев: время сварки, скорость оплавления и осадки, коэффициент наплавки при сварке, потери электродного металла при сварке на угар и разбрызгивание, коэффициент расхода электродов и многие другие критерии, актуальность и выбор которых зависят от вида сварки и свариваемых материалов [2, 4].

С статье рассматриваются результаты исследования процессов (технологий) и управления плазменной сваркой, как самым перспективным направлением сварочного производства [5–7].

**Анализ технологии плазменной сварки.** При плазменной сварке нагрев деталей выполняется направленным потоком дуговой плазмы (плазменной струей), вызывающей плавление свариваемых материалов.

Хотя метод плазменной дуговой сварки металла в защитных газах был разработан ещё в 70-80-х годах 20-го века исследования в данной области остаются актуальными и сейчас, так как многие проблемы процесса сварки далеки от оптимальных решений. Результаты исследований могут быть использованы и для других видов сварки, т.к. независимо от видов сварки и свариваемых материалов, на данный процесс следует смотреть, как на систему, и применять для его анализа методы теории систем [6–8] и системного анализа [9–11].

При выборе типа сварочного процесса в первую очередь уделяется внимание таким параметрам, как качество сварного шва, механическая прочность, герметичность, коррозионная устойчивость и прочие характеристики. Наиболее эффективной по всем качественным показателям сварного шва является плазменная сварка, которая относится к термическому классу сварки и является одним из видов дуговой сварки, что следует учитывать при выборе модели физико-химических процессов плазменной сварки [1, 2].

Для реализации плазменной сварки используются плазменные горелки, которые иногда называют плазмотронами. Плазменная струя формируется из потока сильно ионизированного инертного газа, например аргона, который используют для быстрого охлаждения основного дугового разряда. То есть, плазма представляет собой поток положительно и отрицательно заряженных ионов инертного газа, которые возникают под действием мощных электрических и магнитных полей дугового разряда. При этом температура плазменной струи может достигать 30 000К, что позволяет выполнять сварку самых тугоплавких металлов. Высокая температура быстро плавит кромки свариваемых деталей и формирует прочное соединение [3, 4].

Поскольку существующие методы математического описания процесса сварки являются сложными для их использования в регуляторах при быстром протекании процесса сварки, не гарантируют требуемые качественные характеристики сварного шва, предлагается использовать методы нечеткой логики, в том числе методы гибридного управления.

**Модель гибридного регулятора.** На первом этапе осуществлялось решение задачи управления одним параметром сварки посредством гибридного регулятора. Задача исследования состоит в создании модели гибридного регулятора в среде Matlab Simulink. Целью выполнения моделирования, является оценка и сравнение эффективности применения классического пропорционально-интегрально регулятора (ПИ), пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД) и гибридного регулятора [12, 14].

В системе автоматического управления объектом управления является плазмотрон. Математическую модель плазмотрона определим в виде передаточной функции:

$$W(p) = \frac{ke^{-\tau p}}{(1+T_1p)(1+T_2p)}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент передачи;  $\tau$  – время запаздывания, представляющее собой время распространения тепловой энергии от дуги к металлу;  $T_1$  и  $T_2$  – постоянные времени.

Входным воздействием исполнительного элемента системы автоматического управления сваркой - плазмотрона, является сила тока. Выходная характеристика - глубина проплавления свариваемого листа. На вход плазмотрона подается управляющее воздействие от регулятора (в аппаратной реализации – от усилителя-преобразователя.). Регулятор связан с выходом плазмотрона обратной отрицательной связью.

Задача управления и моделирования состоит в минимизации ошибки отклонения от заданной глубины проплавления материала при выполнении сварки. Рассмотрим применение нечеткого регулятора. В библиотеке Fuzzy Logic размещен нечеткий регулятор. В работе нечеткого регулятора применен алгоритм нечеткого вывода Мамдани [13–15].

Рассмотрим задание лингвистических и нечетких переменных, а также функций принадлежности нечетких переменных на основе знаний экспертов. Определим лингвистические переменные:  $e$  «величина ошибка» и  $int$  - интеграл ошибки, и формально в пакете Matlab определим систему для моделирования, как показано на рис. 1.

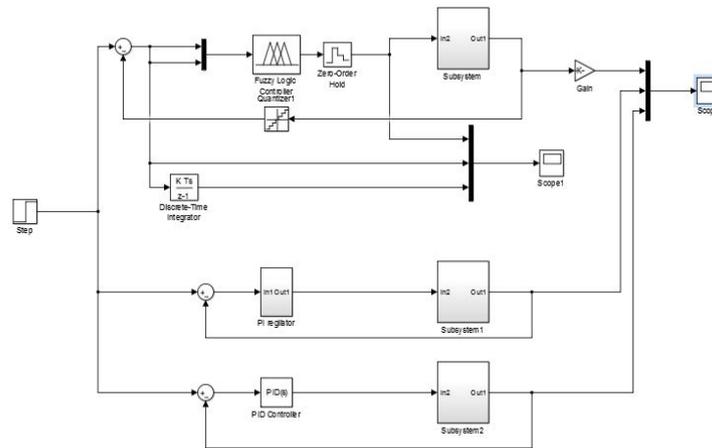


Рис. 1. Структурная схема моделирования поведения гибридного регулятора

При описании терм множеств были использованы общепринятые обозначения:

- ◆ ZN (Zero Negative) – отрицательное, близкое к нулю;
- ◆ Z(Zero) – Нуль, близкий к нулю;
- ◆ ZP (Zero Positive) – Положительное, близкое к нулю;
- ◆ PS (Positive Small) – Положительное малое;
- ◆ PM (Positive Medium) – Положительное среднее;
- ◆ PB(Positive Big) – Положительное большое [15,16, 18].

Для построения модели были определены и описаны лингвистические переменные, характеризующие процесс:

- ◆  $e$  терм-множество  $T(e) = \{ZN - \text{минимальная ошибка слева; } Z - \text{несущественная ошибка; } ZP - \text{(средняя) несущественная ошибка справа; } PS - \text{(большая) небольшая ошибка справа; } PM - \text{(очень большая) значительная ошибка справа}\}$ ;

- ◆  $int$  терм-множество  $T(int) = \{Z - \text{(близкое к нулю) несущественное значение интеграла ошибки}\}$ ;  $ZP - \text{несущественный интеграл ошибки справа; } PS - \text{минимальный интеграл ошибки справа; } PM - \text{существенный интеграл ошибки справа}\}$ ;  $PB - \text{очень большое значение интеграла ошибки справа}\}$ .

На основании анализа экспертной информации было задано множество правил нечеткого логического вывода:

◆  $R_1$ : если ошибка есть  $Z$  – несущественная ошибка и интеграл ошибки  $Z$  – несущественное значение интеграла ошибки, то управляющее воздействие есть  $Z$  – несущественное напряжение;

◆  $R_2$ : если ошибка есть  $ZP$  – (средняя) несущественная ошибка и интеграл ошибки есть  $Z$  – несущественное значение интеграла ошибки, то управляющее воздействие есть  $ZP$  – (среднее) несущественное напряжение;

◆ .....

◆  $R_{18}$ : если ошибка есть  $ZP$  – (средняя) несущественная ошибка и интеграл ошибки есть  $PB$  – очень большое значение интеграла ошибки, то управляющее воздействие есть  $PB$  – колоссальное напряжение.

◆  $R_{19}$ : если ошибка есть  $PS$  – (большая) небольшая ошибка и интеграл ошибки есть  $PB$  – очень большое значение интеграла ошибки, то управляющее воздействие есть  $PMB$  – (большое) колоссальное напряжение.

На рис. 2 показан результат задания экспертных правил в Matlab.

```

1. If (e is Z) and (int is Z) then (u is Z) (0.83)
2. If (e is ZP) and (int is Z) then (u is ZP) (0.83)
3. If (e is PS) and (int is Z) then (u is PS) (0.83)
4. If (e is PM) and (int is Z) then (u is PM) (0.83)
5. If (e is Z) and (int is ZP) then (u is ZP) (0.83)
6. If (e is ZP) and (int is ZP) then (u is PS) (0.83)
7. If (e is PS) and (int is ZP) then (u is PS) (0.83)
8. If (e is PM) and (int is ZP) then (u is PM) (0.83)
9. If (e is Z) and (int is PS) then (u is PS) (0.83)
10. If (e is ZP) and (int is PS) then (u is PS) (0.83)
11. If (e is PS) and (int is PS) then (u is PM) (0.83)
12. If (e is PM) and (int is PS) then (u is PMM) (0.83)
13. If (e is Z) and (int is PM) then (u is PM) (0.83)
14. If (e is ZP) and (int is PM) then (u is PMM) (0.83)
15. If (e is PS) and (int is PM) then (u is PB) (0.83)
16. If (e is PM) and (int is PM) then (u is PB) (0.83)
17. If (e is Z) and (int is PB) then (u is PB) (0.83)
18. If (e is ZP) and (int is PB) then (u is PB) (0.83)
19. If (e is PS) and (int is PB) then (u is PMB) (0.83)

```

Рис. 2. Задание экспертами правил нечеткого логического вывода

В результате была получена поверхность вывода функции принадлежности, представленная на рис. 3, где желтый цвет соответствует максимальному напряжению, синий – минимальному.

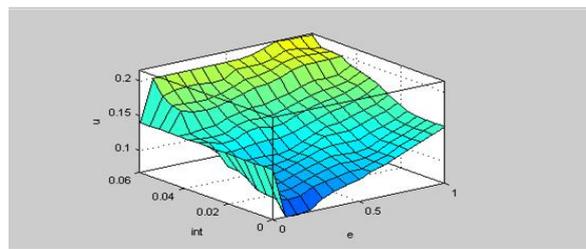


Рис. 3. Окно просмотра поверхности вывода функции принадлежности

Рис. 4 Структурная подпись моделирования гибридного регулятора

В состав моделируемого гибридного регулятора входят сумматор, нечёткий контроллер Fuzzy Logic, цифро-аналоговый преобразователь, модель объекта управления [24, 25]. В цепь отрицательной обратной связи включён аналого-цифровой преобразователь. Для контроля выходного состояния объекта управления (плазмотрона) используется осциллограф.

Для оценки эффективности работы гибридного регулятора, было осуществлено моделирование системы на основе ПИ- и ПИД- регуляторов. На рис. 5 представлены осциллограммы выходных напряжений для всех трёх рассмотренных регуляторов.

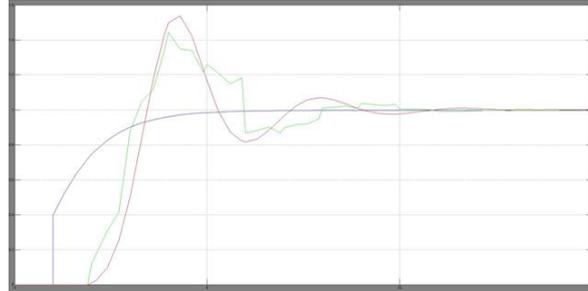


Рис. 5. Переходные характеристики нечеткого контроллера, ПИ-регулятора ПИД-регулятора

На рис. 5 жёлтым цветом представлен выход гибридного регулятора, очевидно, что он обеспечивает окончание переходного процесса через 6с без каких-либо выбросов и осцилляций. Сиреневым цветом представлен выход ПИ-регулятора, переходной процесс затухает только на 15-ой секунде, максимальный выброс составляет 35%. Голубым цветом представлен выход ПИД-регулятора, переходной процесс затухает только на 13-ой секунде, первый выброс напряжения составляет 50%. Следует отметить, что все попытки улучшить переходные процессы для классических ПИ- и ПИД-регуляторов, путём изменения коэффициентов усиления, постоянных интегрирования и дифференцирования не привели к существенному улучшению результатов. Например, при первом выбросе менее 5% для ПИ-регулятора переходной процесс заканчивался на 30с.

**Вывод.** Представленные в статье результаты проведенного моделирование нечёткого гибридного регулятора для управления параметрами плазменной сварки позволяют сделать вывод, что нечеткий регулятор обеспечивает существенно лучшие показатели качества, чем ПИ-регулятор и ПИД-регулятор. Отсутствие перерегулирования позволяет нечеткому регулятору выйти на установившийся режим уже через 6 секунд, ПИ-регулятору требуется 15с, а ПИД-регулятору 13 с. Таким образом показана реальная возможность построения нечёткого гибридного регулятора с заданными характеристиками.

При изменении входных лингвистических переменных наблюдалось изменение степени принадлежности к различным термам выходной лингвистической переменной, но во всех случаях гибридный регулятор превосходил в 2,5–3 раза классические регуляторы по точности и быстродействию. Возможна реализация гибридного регулятора в виде ПЛИС.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чернышов Г.Г. Шагин Д.М. Оборудование и основы технологии сварки металлов плавлением и давлением: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во «Лань», 2013. – 464 с.
2. Еремин Е.Н. Плазменно-дуговые технологические процессы в сварочном производстве. учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2000. – 275 с.
3. Wu C.S. Welding thermal processes and weld pool behaviors. – Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group; 2011. – 321 p.
4. Wu C.S., Wang L., Ren W.J., Zhang X.Y. Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling // Evolution and Materials Processing, and Institute of Materials Joining. Shandong University, Jinan 250061, China, Journal of Manufacturing Processes. – 2014. – Vol. 16. – P. 74-85.

5. *Финаев В.И., Глод О.Д.* Основы теории систем. учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 156 с.
6. *Волкова В.Н., Денисов А.А.* Основы теории систем и системного анализа. – Л.: Изд-во СПбГТУ, 1997. – 510 с.
7. *Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П.* Введение в системный анализ: учеб. пособие. – М.: Высш. школа, 1989. – 367 с.
8. *Funabashi M.* Fuzzy and neural hybrid expert systems: Synergetic AI // IEEE Expert: Intelligent Systems and Their Applications. – 1995. – Vol. 10, Issue 4. – P. 32-40.
9. *Гаврилов А.В., Новицкая Ю.В.* Гибридные интеллектуальные системы. – Новосибирск: НГТУ, 2006.
10. *Goonatilake S., Khebbal S.* Intelligent Hybrid Systems. – Publisher: Wiley, 1995. – ISBN 0471942421.
11. *Финаев В.И.* Модели принятия решений. – Таганрог: ТРТУ, 2005. – 101 с.
12. *Zadeh L.A.* Fuzzy logic and approximate reasoning // Synthese. – 1975. – Vol. 80. – P. 407-428.
13. *Берштейн Л.С., Божениук А.В.* Нечеткие модели принятия решений: дедукция, аналогия: монография. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2001. – 110 с.
14. *Гайдук А.Р.* Непрерывные и дискретные системы управления. – 2-е изд. перераб. – М.: Учебно-методический и издательский центр «Учебная литература», 2004. – 252 с.
15. *Колесников А.В.* Гибридные интеллектуальные системы: теория и технология разработки. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 600 с.
16. *Witsenhausen H.S.* A Class of Hybrid-State Continuous Time Dynamic Systems // IEEE Trans. on Automatic Control. – 1966. – Vol. 11, No. 2.
17. *Игнатьев В.В.* Адаптивные гибридные интеллектуальные системы управления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 12 (113). – С. 89-94.
18. *Zu Ming Liu, Shuang Lin Cui, Zhen Luo, Chang Zhen Zhang, Zheng Ming Wang, Yu Chen Zhang.* Plasma arc welding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling // Journal of Manufacturing Processes. – August 2016. – Vol. 23. – P. 315-327.
19. *Benjamin Das, N. Yadaiah, Rupshree Ozah, Sohini Chowdhury, Arpan Kumar Mondal, M. Muralidhar.* A Perspective Review on Estimation of Keyhole Profile during Plasma Arc Welding Process // Material today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5, Issue 2, Part 1. – P. 6345-6350.
20. *Аль-Шамки Амир Абдулкадим Оуда.* Программное обеспечение для исследования линейных моделей управления на примере управления плазменной сваркой // Технологии разработки информационных систем ТРИС-2019: Матер. конференции. Т. 1. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С. 131-136.
21. *Al-Shamkhee Ameer Abdulkadhim Oudah, Shepelev Anatoliy Fedorovich, Finaev Valeriy Ivanovich & Zargaryan Elena Valerevna.* Research on the possibilities of using linear observation models in welding processes // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. – September 2019. – Vol. 7, No. 3. – P. 1163-1176. – ISSN 2303-4521.
22. *Ignatyev V., Soloviev V., Beloglazov D., Kureychik V., Ignatyeva A., Vorotova A.* System for Automatic Adjustment of Intelligent Controller Parameters // Communications in Computer and Information Science. – 2019. – Vol. 1084. – P. 226-2423. – DOI: 10.1007/978-3-030-29750-3\_18.
23. *Ignatyev V.V., Finaev V.I.* The use of hybrid regulator in design of control systems // World Applied Sciences Journal. – 2013. – Issue 10. – Vol. 23. – P. 1291-1297. – DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.10.13144.
24. *Ignatyev V., Soloviev V., Beloglazov D., Kureychik V., Andrey K., Ignatyeva A.* The Fuzzy Rule Base Automatic Optimization Method of Intelligent Controllers for Technical Objects Using Fuzzy Clustering // Communications in Computer and Information Science: Conference on Creativity in Intelligent Technologies and Data Science, CIT and DS 2019; Volgograd; Russian Federation; 2019–2019. – Vol. 1084. – P. 135-1523. The Code 230149. – DOI: 10.1007/978-3-030-29750-3\_11.
25. *Zargaryan E.V., Zargaryan Y.A., Dmitrieva I.A., Sakharova O.N. and Pushnina I.V.* Modeling design information systems with many criteria. Information Technologies and Engineering – APITECH - 2020 // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 2085 (3). – P. 032057(1-7). – DOI: 10.1088/1742-6596/1679/3/032057.
26. *Шестова Е.А., Шадрин В.В.* Исследование построения видов операций над нечеткими множествами и нечеткой аппроксимирующей системы в среде MATLAB: учеб. пособие. – Таганрог, 2019.

## REFERENCES

1. Chernyshov G.G. SHashin D.M. *Oborudovanie i osnovy tekhnologii svarki metallov plavleniem i davleniem: ucheb. posobie* [Equipment and fundamentals of metal welding technology by melting and pressure: textbook]. Saint Petersburg: Izd-vo «Lan'», 2013, 464 p.
2. Eremin E.N. *Plazmenno-dugovye tekhnologicheskie protsessy v svarochnom proizvodstve. ucheb. posobie* [Plasma-arc technological processes in welding production: textbook]. Omsk: Izd-vo OmGTU, 2000, 275 p.
3. Wu C.S. *Welding thermal processes and weld pool behaviors*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group; 2011, 321 p.
4. Wu C.S., Wang L., Ren W.J., Zhang X.Y. *Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling, Evolution and Materials Processing, and Institute of Materials Joining. Shandong University, Jinan 250061, China, Journal of Manufacturing Processes*, 2014, Vol. 16, pp. 74-85.
5. Finaev V.I., Glod O.D. *Osnovy teorii sistem. ucheb. posobie* [Fundamentals of systems theory: tutorial]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 156 p.
6. Volkova V.N., Denisov A.A. *Osnovy teorii sistem i sistemnogo analiza* [Fundamentals of systems theory and system analysis]. Leningrad: Izd-vo SPbGTU, 1997, 510 p.
7. Peregodov F.I., Tarasenko F.P. *Vvedenie v sistemnyy analiz: ucheb. posobie* [Introduction to System Analysis: textbook]. Moscow: Vyssh. shkola, 1989, 367 p.
8. Funabashi M. *Fuzzy and neural hybrid expert systems: Synergetic AI, IEEE Expert: Intelligent Systems and Their Applications*, 1995, Vol. 10, Issue 4, pp. 32-40.
9. Gavrilov A.V., Novitskaya Yu.V. *Gibridnye intellektual'nye sistemy* [Hybrid intelligent systems]. Novosibirsk: NGTU, 2006.
10. Goonatilake S., Khebbal S. *Intelligent Hybrid Systems*. Publisher: Wiley, 1995. ISBN 0471942421.
11. Finaev V.I. *Modeli prinyatiya resheniy* [Decision making models]. Taganrog: TRTU, 2005, 101 p.
12. Zadeh L.A. *Fuzzy logic and approximate reasoning, Synthese*, 1975, Vol. 80, pp. 407-428.
13. Bershteyn L.S., Bozhenyuk A.V. *Nechetkie modeli prinyatiya resheniy: deduktsiya, analogiya: monografiya* [Fuzzy decision-making models: deduction, analogy: monograph]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2001, 110 p.
14. Gayduk A.R. *Neprieryvnye i diskretnye sistemy upravleniya* [Continuous and discrete control systems]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow: Uchebno-metodicheskiy i izdatel'skiy tsentr «Uchebnaya literatura», 2004, 252 p.
15. Kolesnikov A.V. *Gibridnye intellektual'nye sistemy: teoriya i tekhnologiya razrabotki* [Hybrid intelligent systems: theory and development technology]. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGTU, 2001, 600 p.
16. Witsenhausen H.S. *A Class of Hybrid-State Continuous Time Dynamic Systems, IEEE Trans. on Automatic Control*, 1966, Vol. 11, No. 2.
17. Ignat'ev V.V. *Adaptivnye gibridnye intellektual'nye sistemy upravleniya* [Adaptive hybrid intelligent control systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 12 (113), pp. 89-94.
18. Zu Ming Liu, Shuang Lin Cui, Zhen Luo, Chang Zhen Zhang, Zheng Ming Wang, Yu Chen Zhang. *Plasma arc welding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling, Journal of Manufacturing Processes*, August 2016, Vol. 23, pp. 315-327.
19. Benjamin Das, N. Yadaiah, Rupshree Ozah, Sohini Chowdhury, Arpan Kumar Mondal, M. Muralidhar. *A Perspective Review on Estimation of Keyhole Profile during Plasma Arc Welding Process, Material today: Proceedings*, 2018, Vol. 5, Issue 2, Part 1, pp. 6345-6350.
20. Al'-Shamki Amir Abdulkadim Ouda. *Programmnoe obespechenie dlya issledovaniya lineynykh modeley upravleniya na primere upravleniya plazmennoy svarkoy* [Software for the study of linear control models on the example of plasma welding control], *Tekhnologii razrabotki informatsionnykh sistem TRIS-2019: Mater. konferentsii* [Technologies for the development of information systems TRIS-2019: Conference materials]. Vol. 1. Taganrog: Izd-tvo YuFU, 2019, pp. 131-136.
21. Al-Shamkhee Ameer Abdulkadhim Oudah, Shepelev Anatoliy Fedorovich, Finaev Valeriy Ivanovich & Zargaryan Elena Valerevna. *Research on the possibilities of using linear observation models in welding processes, Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, September 2019, Vol. 7, No. 3, pp. 1163-1176. ISSN 2303-4521.

22. Ignatyev V., Soloviev V., Beloglazov D., Kureychik V., Ignatyeva A., Vorotova A. System for Automatic Adjustment of Intelligent Controller Parameters, *Communications in Computer and Information Science*, 2019, Vol. 1084, pp. 226-2423. DOI: 10.1007/978-3-030-29750-3\_18.
23. Ignatyev V.V., Finaev V.I. The use of hybrid regulator in design of control systems, *World Applied Sciences Journal*, 2013, Issue 10, Vol. 23, pp. 1291-1297. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.10.13144.
24. Ignatyev V., Soloviev V., Beloglazov D., Kureychik V., Andrey K., Ignatyeva A. The Fuzzy Rule Base Automatic Optimization Method of Intelligent Controllers for Technical Objects Using Fuzzy Clustering, *Communications in Computer and Information Science: Conference on Creativity in Intelligent Technologies and Data Science, CIT and DS 2019; Volgograd; Russian Federation; 2019–2019*, Vol. 1084, pp. 135-1523. The Code 230149. DOI: 10.1007/978-3-030-29750-3\_11.
25. Zargaryan E.V., Zargaryan Y.A., Dmitrieva I.A., Sakharova O.N. and Pushnina I.V. Modeling design information systems with many criteria. Information Technologies and Engineering – APITECH – 2020, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, Vol. 2085 (3), pp. 032057(1-7). DOI: 10.1088/1742-6596/1679/3/032057.
26. Shestova E.A., Shadrina V.V. Issledovanie postroeniya vidov operatsiy nad nechetkimi mnozhestvami i nechetkoy approksimiruyushchey sistemy v srede MATLAB: ucheb. posobie [Study of building types of operations on fuzzy sets and a fuzzy approximating system in the MATLAB environment: textbook]. Taganrog, 2019.

Статью рекомендовала к опубликованию к.т.н., доцент Н.А.Иванова.

**Аль-Шамки Амир Абдулкадим Оуда** – Южный федеральный университет; e-mail: al-shamki@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра систем автоматического управления; соискатель на степень кандидата наук.

**Шадрина Валентина Вячеславовна** – e-mail: vvshadrina@sfedu.ru; кафедра систем автоматического управления; зав. кафедрой; к.т.н.; доцент.

**Галалу Валентин Гаврилович** – e-mail: v.galalu@mail.ru; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

**Al-Shamki Amir Abdulkadim Ouda** –Southern Federal University; e-mail: al-shamki@sfedu.ru; Taganrog, Russia; the department of automatic control systems; cand. for the degree of cand. sc.

**Shadrina Valentina Vyacheslavovna** – e-mail: vvshadrina@sfedu.ru; the department of automatic control systems; head of the department; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Galalu Valentin Gavrilovich** – e-mail: v.galalu@mail.ru; the department of automatic control systems; candidate of technical sciences; associate professor.