

М. В. Бобырь, д-р техн. наук, проф., fregat_mn@rambler.ru,
С. А. Кулабухов, аспирант, kulabuhov.sergei@yandex.ru,
А. С. Якушев, магистрант, alekseyakushev@yandex.ru,
 Юго-Западный государственный университет, Курск

Нечеткая иерархическая система угловой ориентации мобильного робота. Часть II^{1, 2}

Описан второй уровень иерархической нечеткой системы управления угловой ориентацией мобильного робота при прохождении лабиринта. Доказана применимость нечетко-логического вывода в системе управления и возможность использования в робототехнических мини-платформах. Представлен механизм обработки информации, получаемой от датчиков, установленных на нем. Предложено использование метода разности площадей для дефазификации результата при расчете времени задержки, а также проведение адаптации термов выходной функции принадлежности для увеличения точности угловой ориентации. Рассмотрены экспериментальные результаты прохождения лабиринта мобильным роботом.

Ключевые слова: мобильный робот, лабиринт, Arduino, инфракрасный дальномер Sharp 2D120X, ультразвуковой дальномер HC-SR04, нечеткая логика, иерархическая нечеткая система управления, метод разности площадей, адаптация функции принадлежности, RMSE

Введение

Современная робототехника успешно развивается, и разработчики автоматизированных и автономных механизированных устройств сталкиваются с проблемой их координации при движении, так как при самостоятельном движении возникает необходимость определения углов поворотов для объезда препятствий. Некоторые зарубежные авторы в своих алгоритмах управления подобными системами используют сложные тригонометрические вычисления и матрицы [1–3] для определения углов. Это, в свою очередь, значительно увеличивает сложность программирования управляющих систем, и, как следствие, объем программного кода резко возрастает.

При навигации роботов по координатам известной карты ученые используют декартовую систему координат и матрицы с данными о каждой точке местности для точного определения положения робота. Однако использование большого числа переменных данных в вычислениях ведет к увеличению среднеквадратического отклонения при оценке точности расчетов, при этом сложность программного кода также увеличивается.

Мобильные системы, разработанные на микроплатах, таких как Arduino, в силу небольшого объема внутренней памяти (порядка 32 кбайт) не позволяют хранить такой объем данных, поэтому подобные вычисления не могут быть реализованы на таких микроплатах. Для сокращения объемов кодов программы разработчики прибегают к использованию нечеткой логики [4–5]. Но использование традиционных методов при угловой ориентации для объезда препятствий на основе жестких формул приводит к отсутствию свойства аддитивности системы в

целом и, как следствие, к отсутствию реакции системы в некоторых диапазонах входных значений [6, 7].

Исходя из вышесказанного авторами предлагается иерархическая нечеткая система управления мобильными роботами с использованием мягких арифметических операций в структуре нечеткого вывода. Она учитывает указанные выше недостатки и дает высокую точность расчетов и приемлемый размер программного кода для использования в автономных мобильных системах.

Обработка информации, получаемой с датчиков

Для работы иерархической системы угловой ориентации мобильного робота применяют датчики расстояний, передающие информацию о расстоянии до окружающих объектов [8]. Основными дальномерами, применяющимися в системе, являются инфракрасные датчики малой дальности Sharp 2D120X F 05 и ультразвуковой датчик HC-SR04 средней дальности.

В мобильном роботе, рассматриваемом в данной работе (см. Часть I) используются три инфракрасных датчика.

Подключение инфракрасных датчиков к управляющей плате Arduino с помощью установленной на ней платы Troyka Shield представлено на рис. 1 (см. вторую сторону обложки).

Правый и левый датчики закрепляются по бокам мобильного робота и отвечают за контроль стен углов лабиринта, третий — центральный датчик расстояния, закрепленный в передней части робота, — отслеживает появление объектов-препятствий впереди.

Ультразвуковой дальномер неподвижно закрепляется на сервоприводе, используемом для его поворота на 180°. Схема подключения сервопривода и датчика HC-SR04 к плате Arduino представлена на рис. 2 (см. вторую сторону обложки).

¹ Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МД-2983.2015.8.

² Часть I опубликована в журнале "Механика, автоматизация, управление", 2016, т. 17, № 7, с. 458–464.

После запуска кода, управляющего движением, робот каждые 20 мс проверяет показания с инфракрасных датчиков.

Если датчики сообщают о том, что впереди свободно больше 8 см, а справа и слева — больше 10 см, то робот продолжает выполнять прямолинейное движение вперед. В случае, когда расстояние на одном из датчиков оказывается меньше допустимого, робот останавливается. Далее необходимо установить, какой из датчиков увидел препятствие, и согласно этим данным принять решение о следующем действии.

В ситуации, когда левый и центральный датчик сообщают о том, что расстояние для движения достаточно, а правый сигнализирует о наличии препятствия, система управления движением подает питание на двигатели и поворачивает робот на 30° влево. В ситуации, когда уже левый датчик сообщает о наличии препятствия, а два других говорят о возможности продолжения движения, робот поворачивается на 30°, но уже вправо. Подобная система контроля объектов, расположенных по бокам, позволяет роботу двигаться в узких коридорах, а также экономить время на поиске обходных путей и проходить лабиринт значительно быстрее. На рис. 3 представлен алгоритм выполнения описанных действий.

В случае, когда невозможно двигаться вперед, ситуация контролируется с помощью центрального лазерного датчика. Робот переходит в стадию поиска направления дальнейшего движения, и на этом этапе происходит определение входной лингвистической переменной второго уровня иерархии — угла поворота. Здесь в работу вступает ультразвуковой сенсор. Принцип поиска пути представлен в виде блок-схемы на рис. 4.

После выполнения всех действий по поиску пути объезда препятствия робот поворачивается на необходимый угол и продолжает движение [9–10]. Схема управления поворотом робота представлена на рис. 5.

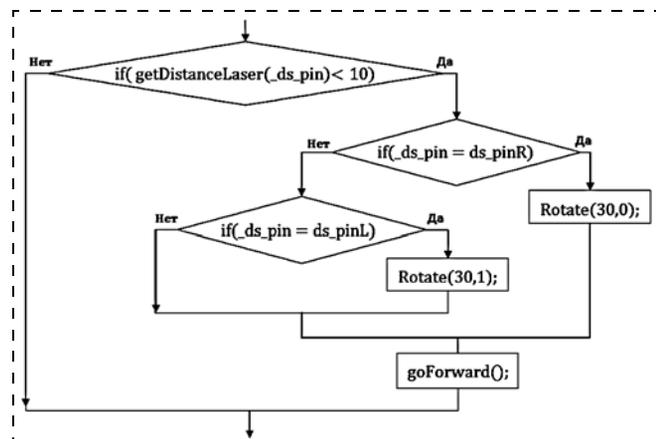


Рис. 3. Блок-схема алгоритма контроля препятствий при движении вперед: Rotate(30,0) — функция поворота (первый параметр (30) — угол, на который необходимо повернуться; второй параметр (0) — указание стороны (0 — влево, 1 — вправо)); goForward() — функция движения вперед



Формирование массивов переменных для хранения расстояний, полученных от ультразвукового датчика
 Запуск цикла просмотра положения объектов вокруг для поиска максимального расстояния для продолжения движения
 Получаем показания датчика три раза для увеличения точности работы
 Получение показаний
 Расчет среднего значения дистанции из трех запрошенных.
 Добавление значения в список всех дистанций с привязкой к углу направления
 Расчет максимального значения расстояния и угла, связанного с ним

Рис. 4. Блок-схема алгоритма определения максимального расстояния и связанного с ним угла

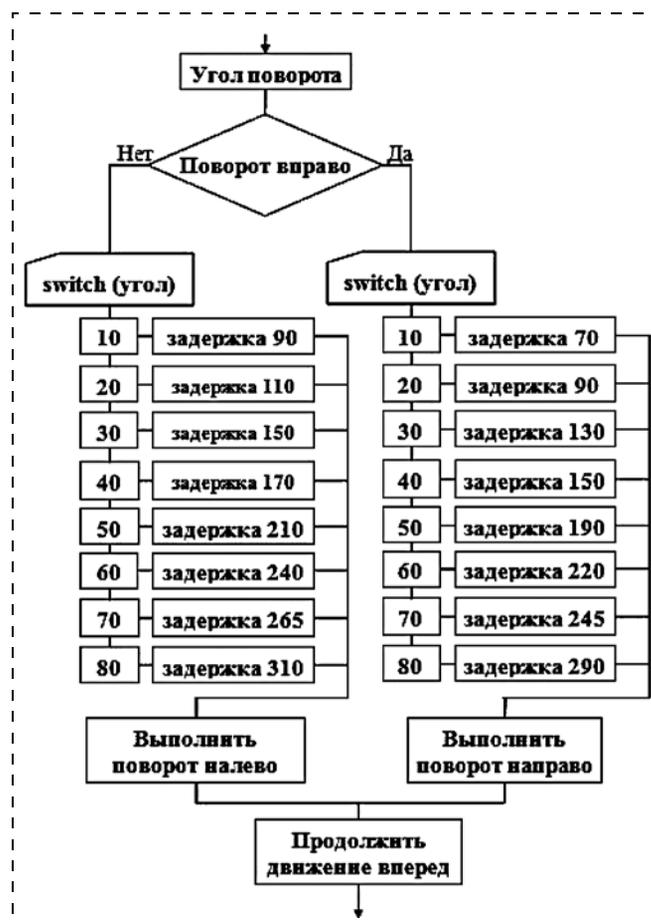


Рис. 5. Блок-схема управления поворотами мобильного робота

В блок-схеме показано, что каждый угол, на который необходимо совершить поворот, связан с конкретным временем задержки [11]. Данная взаимосвязь является следствием экспериментов, подробно описанных в первой части статьи.

Второй уровень иерархической системы управления мобильным роботом

Математическая модель нечеткой иерархической системы угловой ориентации мобильного робота может быть представлена в виде

$$t = f(\alpha; v) = f(\alpha; f(m; u)), \quad (1)$$

где $f(\alpha, v)$ — функция нечеткого вывода от входных параметров; t — время задержки; m — масса робота; u — напряжение; α — угол поворота; v — скорость движения [12].

Входными переменными второго уровня являются скорость v (м/с) движения и угол α (°), на который необходимо повернуть робот в случае обнаружения препятствия перед ним. Параметр скорости, как видно из формулы (1), формируется на выходе первого уровня иерархической системы.

Информация о скорости и угле поворота позволяют найти ключевой параметр для поворота робота в лабиринте при объезде препятствий — время задержки t (мс). Оно показывает, на какой временной промежуток требуется подача постоянного питания на моторы мобильного робота, чтобы он смог развернуться на необходимый угол для объезда препятствия.

Алгоритм адаптации функций принадлежности

Первым шагом нечеткого вывода является построение функции принадлежности (см. часть I, рис. 5). Проведенные исследования показали [13], что после обучения нечеткой системы увеличивается ее точность. Оценку осуществляли на основе расчета среднеквадратического отклонения (RMSE — root mean square error).

Метод заключается в перемещении вершин термов ФП вправо и влево до тех пор, пока не будет получено минимальное значение RMSE.

Дефазификация результата проводится на основе метода разности площадей [14], благодаря чему значительно сглаживается поверхность отклика результирующей переменной. Также в системе расчетов используется алгоритм адаптации выходной функции принадлежности, уменьшающий показатель RMSE результирующих значений от эталонной выборки. В результате было получено значение RMSE, равное 2,6 для жестких вычислений, а использование мягких арифметических операций позволило добиться $RMSE = 0,11$.

Эксперимент

С использованием построенной иерархической системы управления было проведено численное

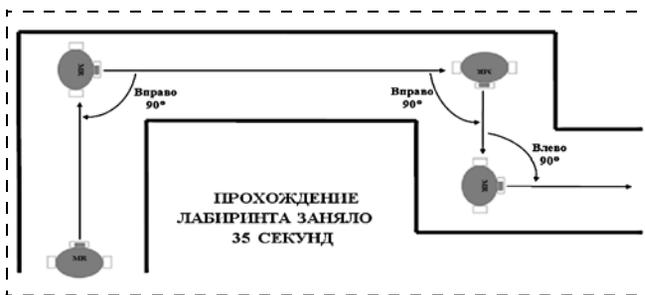


Рис. 8. Общий вид экспериментального лабиринта

моделирование работоспособности системы. При расчете были использованы жесткие и мягкие арифметические операции, выполнен полный перебор всех возможных входных значений и получены графики, представленные на рис. 6 (см. вторую сторону обложки).

Проведенное моделирование показало, что мягкие нечеткие вычисления дают более гладкую поверхность отклика и работают со всеми диапазонами значений, т.е. обладают свойством аддитивности в отличие от жесткой модели нечеткого вывода.

Разработанная нечеткая иерархическая система угловой ориентации была реализована в мобильном роботе на платформе Arduino. Результаты прохождения роботом лабиринта [15] представлены на слайдах рис. 7 (см. вторую сторону обложки).

Для наглядного представления всего лабиринта и движения робота на рис. 8 представлена схема движения с указанием остановок и поворотов мобильного робота.

В ходе прохождения лабиринта были сделаны три ключевые остановки. На полное прохождение роботу потребовалось 35 с.

Заключение

В результате исследования иерархической нечеткой системы управления мобильным роботом на практике следует отметить, что в целях минимизации RMSE целесообразно использовать мягкие арифметические операции в системе нечеткого вывода. Наличие мягких формул [16—17] увеличивает точность системы более, чем в 25 раз. На практике это было доказано с помощью расчета коэффициента среднеквадратического отклонения RMSE. Для системы с использованием мягких формул RMSE составил 0,11, в то время как при использовании жестких вычислений он составлял порядка 2,6.

На основании разработанной нечеткой иерархической системы создано алгоритмическое обеспечение для управления мобильным роботом, позволяющее ему ориентироваться в лабиринте и находить выход из него. Система угловой ориентации, применимая для роботов с различной массой и источниками питания, позволяет точно определять маршрут объезда препятствий [18].

Важно сказать о том, что использование алгоритма нечеткого вывода позволило сократить объ-

ем программного кода на 25 %, что свидетельствует в пользу применения подобных систем в системах управления мобильными роботами.

Список литературы

1. Гранский Н. И., Мальцевский В. В., Засед В. В., Михайлов А. А. Способ определения параметров, характеризующих ориентацию тележки транспортного средства. Патент на изобретение № 2300738 от 14.12.2005. Опубликовано 10.06.2007 Бюл. № 16.
2. Yung-Chang Luo, Wei-Xian Chen. Sensorless stator field orientation controlled induction motor drive with a fuzzy speed controller // Computers & Mathematics with Applications. 2012. Vol. 64, Iss. 5. P. 1206—1216.
3. Гранский Н. И., Мальцевский В. В., Засед В. В., Михайлов А. А. Способ определения пространственного положения и угловой ориентации тележки транспортного средства. Патент на изобретение № 2303240 от 02.03.2006. Публ. 20.07.2007. Бюл. № 20.
4. Li Qin, Fucui Liu, Lihuan Liang, Jingfang Gao. Fuzzy adaptive robust control for space robot considering the effect of the gravity // Chinese Journal of Aeronautics. 2014. Vol. 27, Iss. 6. P. 1562—1570.
5. Fatemeh Fathinezhad, Vali Derhami, Mehdi Rezaeian. Supervised fuzzy reinforcement learning for robot navigation // Applied Soft Computing. 2016. Vol. 40. P. 33—41.
6. Бобырь М. В., Титов Д. В., Кулабухов С. А. Оценка влияния числа обучаемых точек на аддитивность нечетких систем // Промышленные АСУ и контроллеры. 2014. № 10. С. 30—35.
7. Бобырь М. В., Милостная Н. А. Нечеткая модель интеллектуальной системы управления мобильным роботом // Проблемы машиностроения и автоматизации (Engineering and automation problems). 2015. № 3. С. 57—67.
8. Щербатов И. А. Интеллектуальное управление робототехническими системами в условиях неопределенности // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2010. № 1. С. 73—77.
9. Щербатов И. А. Коррекция глобальной цели в интеллектуальных системах управления сложными слабо-формализуемыми системами // Автоматизация. Современные технологии. 2014. № 6. С. 34—40.
10. Титов В. С., Бобырь М. В., Кулабухов С. А. Учет инерционности в нечетко-логических системах управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. № 12. С. 14—19.
11. Бобырь М. В., Титов Д. В., Кулабухов С. А. Оценка прогнозирования принятия решений в условиях неопределенности. Телекоммуникации. 2015. № 11. С. 39—44.
12. Бобырь М. В. Адаптация системы управления мобильным роботом на основе нечеткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 7. С. 449—455.
13. Бобырь М. В., Кулабухов С. А. Дефазификация вывода из базы нечетких правил на основе метода разности площадей // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 9. С. 32—41.
14. Седов В. А., Седова Н. А. Интеллектуальная система управления движением робота, движущегося по линии // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. 2013. № 3. С. 262—267.
15. Бобырь М. В., Титов Д. В., Кулабухов С. А. О некоторых свойствах мягкого алгоритма нечетко-логического вывода // Известия Юго-Западного государственного университета. Сер. Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 2 (59). С. 39—51.
16. Бобырь М. В., Титов В. С., Милостная Н. А., Глобин П. В. Оценка достоверности при моделировании нечетко-логических систем // Промышленные АСУ и контроллеры. 2012. № 7. С. 32—38.
17. Бобырь М. В. Диагностика оборудования с ЧПУ методами нечеткой логики // Промышленные АСУ и контроллеры. 2010. № 1. С. 18—20.

Hierarchical Fuzzy Control System for a Mobile Robot Angular Orientation. Part II

M. V. Bobyr, fregat_mn@rambler.ru ✉, S. A. Kulabuhov, kulabuhov.sergei@yandex.ru,
A. S. Yakushev, alekseyakushev@yandex.ru,
South-West State University, Kursk, 305040, Russian Federation

Corresponding author: Bobyr Maksim V., D. Sc., Professor of Computer Engineering in the South-West State University, Kursk, 305040, Russian Federation, e-mail: fregat_mn@rambler.ru

Received on March 23, 2016

Accepted on March 30, 2016

The paper presents the method of the angular orientation for a mobile robot passing obstacles in a labyrinth. A small RAM of the microcontroller is one of the drawbacks in the mobile robots' control system. In order to compensate for it the authors suggest using fuzzy hierarchical system of the angular orientation of the mobile robots. An advantage of this system is a smaller number of computations. This is possible because the output information is supplied to the next level of the fuzzy hierarchical system without the use of defuzzification. The input information for the fuzzy hierarchical system of control of a mobile robot is the data, which comes from the laser and ultrasonic sensors. Proceeding from this information, the paper presents the algorithms, which allow a mobile robot to detect obstacles and bypass them. Besides, the circuits connecting the sensors to a mobile robot are shown. The second part of the paper presents the top level of the fuzzy hierarchical control system of the angular orientation of a mobile robot. A distinctive feature of the fuzzy hierarchical system is that the model difference areas are used in the defuzzification. Simulation of the fuzzy hierarchical system was realized, when hard and soft arithmetic operations were used in the fuzzy inference. The presented graphs of the results of the work of the fuzzy hierarchical system show the effectiveness of the proposed solutions. The experimental results of bypassing of the labyrinth by a mobile robot also confirmed the adequacy of the developed fuzzy hierarchical control system of the angular orientation for a mobile robot.

Keywords: mobile robot, maze, Arduino, infrared (Sharp 2D120X) range finder, ultrasonic range finder HC-SR04, fuzzy logic, hierarchical fuzzy control system, squares difference method, adaptation of the membership function, RMSE

Acknowledgements: This work was supported by the RF President Grant MD-2983.2015.8.

For citation:

Bobyр M. V., Kulabuhov S. A., Yakushev A. S. Hierarchical Fuzzy Control System for a Mobile Robot Angular Orientation. Part II, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 7, pp. 531—535.

DOI: 10.17587/mau.17.531-535

References

1. **Granskiy N. I., Malyshevsky V. V., Zased V. V., Mikhailov A. A.** *Sposob opredeleniya parametrov, kharakterizuyushchikh orientatsiyu teleshki transportnogo sredstva* (Method for determining parameters characterizing the orientation of the vehicle bogie). The patent for the invention № 2300738 from 14.12.2005. Published 10.06.2007 Bull. № 16 (in Russian).
2. **Yung-Chang Luo, Wei-Xian Chen.** Sensorless stator field orientation controlled induction motor drive with a fuzzy speed controller, *Computers & Mathematics with Applications*, 2012, vol. 64, iss. 5, pp. 1206—1216.
3. **Granskov N. I., Malcev V. V., Zased V. V., Mikhailov A. A.** *Sposob opredeleniya prostranstvennogo polozheniya i uglovoi orientatsii teleshki transportnogo sredstva* (Method for determining the spatial position and angular orientation of the vehicle bogie). The patent for the invention № 2303240 from 02.03.2006. Published 20.07.2007 Bull. № 20 (in Russian).
4. **Li Qin, Fucui Liu, Lihuan Liang, Jingfang Gao.** Fuzzy adaptive robust control for space robot considering the effect of the gravity, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2014, vol. 27, iss. 6, pp. 1562—1570.
5. **Fatemeh Fathinezhad, Vali Derhami, Mehdi Rezaeian.** Supervised fuzzy reinforcement learning for robot navigation, *Applied Soft Computing*, 2016, vol. 40, pp. 33—41.
6. **Bobyр M. V., Titov D. V., Kulabuhov S. A.** *Otsenka vliyaniya chisla obuchaemykh tochek na additivnost' nechetkikh sistem* (Assessing the impact of the number of students points on additive fuzzy systems), *Industrial ACS and Controllers*, 2014, no. 10, pp. 30—35 (in Russian).
7. **Bobyр M. V., Milostnaya N. A.** *Nechetkaya model' intellektual'noi sistemy upravleniya mobil'nym robotom* (Fuzzy model of intellectual mobile robot control systems), *Problems of Mechanical Engineering and Automation (Engineering Andautomation Problems)*, 2015, no. 3, pp. 57—67 (in Russian).

8. **Shcherbatov I. A.** *Intellektual'noe upravlenie robototekhnicheskimi sistemami v usloviyakh neopredelennosti* (Intelligent robotic systems under uncertainty), *Journal of Astrakhan State Technical University. Series: Control, computer engineering and computer science*, 2010, no. 1, pp. 73—77 (in Russian).

9. **Shcherbatov I. A.** *Korreksiya global'noi tseli v intellektual'nykh sistemakh upravleniya slozhnymi slabo-formalizuemymi sistemami* (Correction of the global objectives of smart complex weakly formalizable systems control systems), *Automation. Modern technologies*, 2014, no. 6, pp. 34—40 (in Russian).

10. **Titov V. S., Bobyr M. V., Kulabuhov S. A.** *Uchet inertsionnosti v nechetko-logicheskikh sistemakh upravleniya* (Accounting for persistence in the fuzzy-logic control systems), *Instruments and Systems. Management, Monitoring, Diagnostics*, 2014, no. 12, pp. 14—19 (in Russian).

11. **Bobyр M. V., Titov D. V., Kulabuhov S. A.** *Otsenka prognozirovaniya prinyatiya reshenii v usloviyakh neopredelennosti* (Evaluation of forecasting decision-making under uncertainty), *Telecommunications*, 2015, no. 11, pp. 39—44 (in Russian).

12. **Bobyр M. V.** *Adaptatsiya sistemy upravleniya mobil'nym robotom na osnove nechetkoi logiki* (Adaptation of mobile robot control system based on fuzzy logic), *Mechatronics, Automation, Control*, 2015, vol. 16, no. 7, pp. 449—455 (in Russian).

13. **Bobyр M. V., Kulabuhov S. A.** *Defazzifikatsiya vyvoda iz bazy nechetkikh pravil na osnove metoda raznosti ploshchadei* (Defuzzification output from the base of fuzzy rules based on the method of squares difference), *Herald of computer and information technologies*, 2015, no. 9, pp. 32—41 (in Russian).

14. **Sedov V. A., Sedova N. A.** *Intellektual'naya sistema upravleniya dvizheniem robota, dvizhushchegosya po linii* (Intelligent robot motion control system, moving along the line), *Information technologies. Electronics. Telecommunications*, 2013, no. 3, pp. 262—267 (in Russian).

15. **Bobyр M. V., Titov D. V., Kulabuhov S. A.** *O nekotorykh svoistvakh myagkogo algoritma nechetko-logicheskogo vyvoda* (On some properties of soft algorithm fuzzy inference), *Proc. of the South-Western State University. Series management, computer engineering, computer science. Medical device*, no. 2 (59), 2015, pp. 39—51 (in Russian).

16. **Bobyр M. V., Titov V. S., Milostnaya N. A., Globin P. V.** *Otsenka dostovernosti pri modelirovanii nechetko-logicheskikh sistem* (Evaluation of reliability for modeling fuzzy logic systems), *Industrial ACS and controllers*, 2012, no. 7, pp. 32—38 (in Russian).

17. **Bobyр M. V.** *Diagnostika oborudovaniya s ChPU metodami nechetkoi logiki* (Diagnostics equipment CNC methods of fuzzy logic), *Industrial ACS and controllers*, 2010, no. 1, pp. 18—20 (in Russian).



СЕДЬМАЯ МЕЖОТРАСЛЕВАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ "АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА — 2016"

г. Москва, 29 ноября 2016 г., ГК "ИЗМАЙЛОВО"

Организатор конференции
ООО "ИНТЕХЭКО"

Тематика конференции



- Актуальные задачи автоматизации в промышленности
- Современные информационные технологии повышения уровня эффективности, экономичности и промышленной безопасности промышленных предприятий
- Информационно-управляющие системы промышленной автоматизации (АСУТП, АСОДУ, ERP, MES-системы и др.)
- Автоматизация электроснабжения промышленных предприятий. Системы энергоменеджмента
- Практический опыт внедрения информационных систем на предприятиях различных отраслей
- Последние достижения в области контрольно-измерительной техники
- Новейшие типы газоанализаторов, расходомеров, спектрометров, средств мониторинга, контроля и учета, различные типы датчиков
- Системы управления нормативно-справочной информацией
- Автоматизация проектирования, измерений и испытаний

Контактная информация

admin@intecheco.ru

т.: + 7 (905) 567-8767

ф.: + 7 (495) 737-7079

www.intecheco.ru