

УДК 681.51:681.3

А.Н. Корнилков, Н.Г. Липатников, Ю.Н. ХижняковПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ «СЕГВЕЙ» НА БАЗЕ
АДАПТИВНОГО НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА**

Использование в различных областях науки и техники интеллектуальных систем управления способствует воспроизведению функций естественного интеллекта. Искусственный интеллект есть разработка аппаратно-программных средств для имитации естественного интеллекта, где целесообразно использовать методы, специально ориентированные на построение моделей, учитывающих неполноту и неточность исходных данных.

В статье рассматривается физическая модель сегвей, представляющая собой неустойчивую маятниковую систему на подвижном основании, целью которого являлось создание и исследование адаптивного нечеткого регулятора, поддерживающего сегвей в состоянии равновесия.

Математическое описание физической модели получено с помощью уравнения Лагранжа. Рассмотрена задача стабилизации при различных воздействиях на неустойчивую систему, например, при добавлении дополнительной массы на платформу удерживать ее вертикально. Датчиком отклонения в сегвей служит модуль трёхосевого гироскопа и акселерометра *10 DOF IMU Sensor*, который обменивается с микроконтроллером по *I2C* шине. «Сырые» данные приходят на контроллер типа *Arduino Leonardo* по *I2C*, где они обрабатываются и по трёхпроводному интерфейсу поступают на драйвер *Motor Shield L298P* для электродвигателей. Скорости обмена хватает для запроса данных из модуля и балансирования платформой. Управление скоростью подаётся в виде ШИМ-сигнала на два электродвигателя с дифференциальным приводом для отработки отклонения от вертикали. Для доказательства решаемой задачи реализована физическая модель сегвей с интегрированным в контроллер *Arduino Leonardo* адаптивным нечётким регулятором.

Ключевые слова: сегвей, функция Лагранжа, адаптивный нечеткий регулятор, фаззификация, нейрон, метод последовательного обучения, активационная функция.

A.N. Kornilkov, N.G. Lipatnikov, Yu.N. Hizhnyakov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**DEVELOPMENT CONTROL SYSTEM OF SEGWAY BASED
ON FUZZY ADAPTIVE CONTROLLER**

Use of intelligent control systems in various fields of science and technology facilitates of reproduction of natural intellect. The artificial intelligence is the development of hardware and software for imitation of natural intelligence where it is expedient to use the methods which are specially focused on creation of the models considering incompleteness and inaccuracy of basic data.

In this article the physical model of Segway, representing unstable pendulum system on the mobile basis which purpose was creation and research of the fuzzy adaptive controller supporting Segway in an equilibrium state is considered.

The mathematical description of the physical model is obtained with the help of Lagrange equations. The problem of stabilization at various influences on an unstable system, for example, adding more weight to the platform, hold it vertically, is considered. Sensor of deviations in Segway is module three-axis gyroscope and accelerometer 10 DOF IMU Sensor, which communicates with the microcontroller via the I2C bus. "Raw" data comes to the controller Arduino Leonardo for I2C bus, where they are processed and three-wire interface provided to the driver Motor Shield L298P for electric motors. There is enough speed of an exchange for request of data from the module and balancing with a platform. Speed control is supplied in the form of a PWM signal to the two electric motors with a differential engine for testing the deviation from the vertical.

To prove the problem being solved physical model of Segway with an integrated fuzzy adaptive controller in Arduino Leonardo is implemented.

Keywords: Segway, Lagrange's function, fuzzy adaptive controller, fuzzification, neuron, method of consecutive training, activation function.

Введение. За последние двадцать лет был сделан огромный скачок в использовании в различных областях науки и техники интеллектуальных систем управления, таких как системы нечеткого управления. Актуальность технологии нечеткого управления обусловлена двумя тенденциями [1, 2, 3]:

– увеличением сложности математических моделей реальных систем, связанной с повышением их адекватности, и учетом различных факторов, оказывающих влияние на процесс принятия решений;

– тем, что классические методы построения моделей не приводят к удовлетворительным результатам, когда исходное описание проблемы заведомо является неточным и неполным.

Принимая во внимание эти факторы, целесообразно использовать методы, которые специально ориентированы на построение моделей, учитывающих неполноту и неточность исходных данных.

Математическое описание физической модели сегвей. В работе рассматривается физическая модель «сегвей», изображенная на рис. 1, представляющая собой неустойчивую маятниковую систему на подвижном основании, целью которой являлось создание и исследование нечеткого регулятора, поддерживающего «сегвей» в состоянии равновесия.

Для синтеза управления, стабилизирующего сегвей в верхнем неустойчивом положении равновесия, была описана математическая модель объекта управления [4–7]. При разработке математической модели «сегвей» использованы следующие параметры: m – масса колес; R – радиус колес; J_w – момент инерции колес; M – масса платформы; W, D, H – длина, ширина и высота платформы; L – расстояние между осью сегвей и центром его масс; θ – угол поворота колес; ψ –

угол наклона платформы; φ – рыскание; $U_{l,r}$ – напряжение, прикладываемое на левый и на правый моторы.

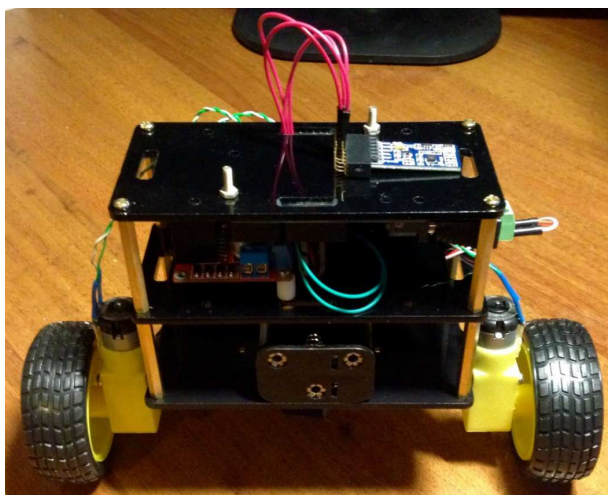


Рис. 1. Внешний вид физической модели «сегвей»

На рис. 2, *а* представлена общая трехмерная модель макета «сегвей». Для стабилизации объекта необходимо перемещать в горизонтальной плоскости платформу.

На рис. 2, *б* изображен вид слева, а на рис. 2, *в* – вид сверху и определена система координат x, y, z , в рамках которой синтезируется математическая модель.

Мы можем получить уравнение для сегвей с помощью уравнения Лагранжа, основываясь на системе координат, изображенной на рис. 2, *б, в*. Если координаты сегвей по оси x имеют положительное направление при условии $t = 0$, то координаты задаются следующим образом:

$$(x_m, y_m, z_m) = (R\theta \cos \varphi, R\theta \sin \varphi, R), (\theta, \varphi) = \left(\frac{1}{2}(\theta_l + \theta_r), \frac{R}{W}(\theta_r - \theta_l) \right),$$

$$(x_b, y_b, z_b) = (x_m + L \sin \psi \cos \varphi, y_m + L \sin \psi \sin \varphi, z_m + L \cos \psi),$$

где x_b, y_b, z_b – координаты центра точки неустойчивого положения равновесия, L – функция Лагранжа [8–12];

$$(x_r, y_r, z_r) = \left(x_m + \frac{W}{2} \sin \varphi, y_m - \frac{W}{2} \cos \varphi, z_m \right),$$

где x_r, y_r, z_r – координаты центра правого колеса;

$$(x_l, y_l, z_l) = (x_m - \frac{W}{2} \sin \phi, y_m + \frac{W}{2} \cos \phi, z_m),$$

где x_l, y_l, z_l – координаты центра левого колеса.

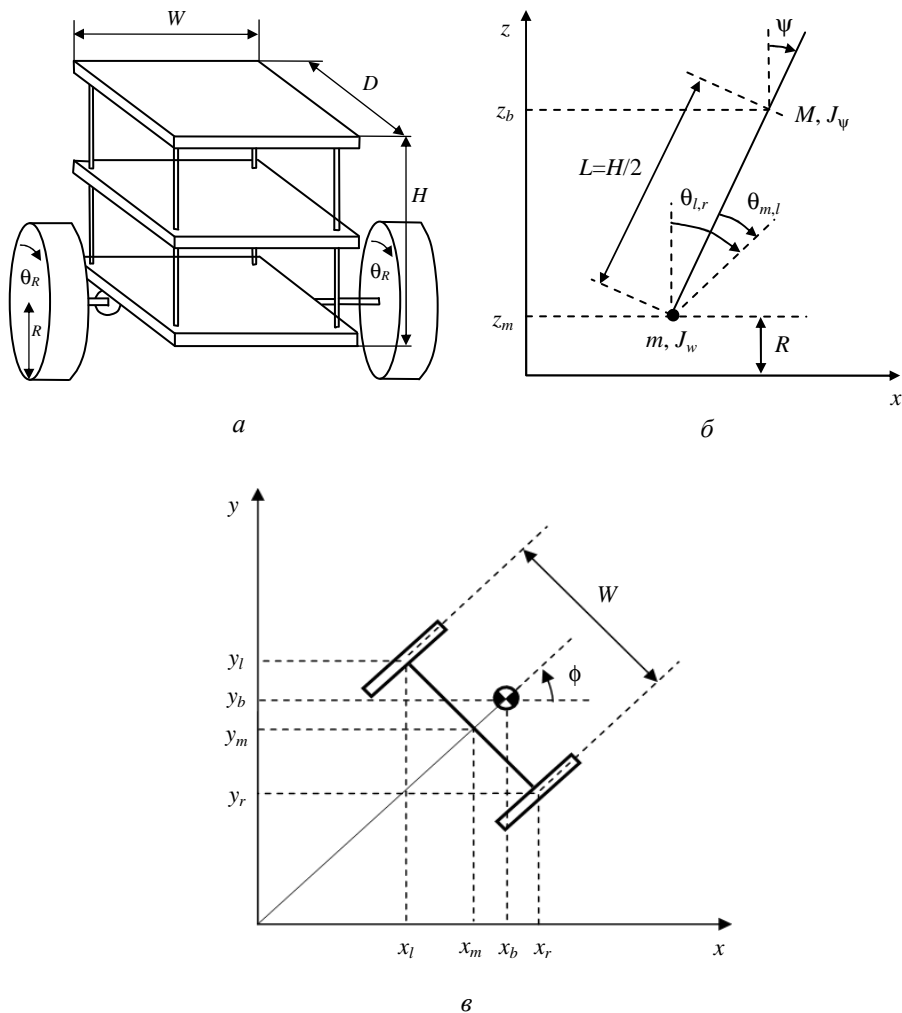


Рис. 2. Физическая модель «сегвей»

Для вычисления функции Лагранжа необходимо записать энергетические уравнения для системы.

$$L = E_{k1} + E_{k2} - E_p,$$

где E_{k1} – кинетическая энергия поступательного движения; E_{k2} – кинетическая энергия вращательного движения; E_p – потенциальная энергия.

$$E_{k1} = \frac{1}{2}m(\dot{x}_l^2 + \dot{y}_l^2 + \dot{z}_l^2) + \frac{1}{2}m(\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2 + \dot{z}_r^2) + \frac{1}{2}M(\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2 + \dot{z}_b^2),$$

где M – масса платформы, m – масса колеса.

$$E_{k2} = \frac{1}{2}J_w\dot{\theta}_l^2 + \frac{1}{2}J_w\dot{\theta}_r^2 + \frac{1}{2}J_\psi\dot{\psi}^2 + \frac{1}{2}J_\phi\dot{\phi}^2 + \frac{1}{2}n^2J_m(\dot{\theta}_l - \dot{\psi})^2 + \\ + \frac{1}{2}n^2J_m(\dot{\theta}_r - \dot{\psi})^2$$

где J_w – момент инерции колеса, $J_w = \frac{mR^2}{2}$; J_ψ – момент инерции маятника при вертикальном отклонении, $J_\psi = \frac{ML^2}{3}$; J_ϕ – момент инерции маятника при горизонтальном отклонении, $J_\phi = \frac{M}{12}(W^2 + D^2)$; J_m – момент инерции двигателя, n – передаточное соотношение редуктора.

где J_w – момент инерции колеса, $J_w = \frac{mR^2}{2}$; J_ψ – момент инерции маятника при вертикальном отклонении, $J_\psi = \frac{ML^2}{3}$; J_ϕ – момент инерции маятника при горизонтальном отклонении, $J_\phi = \frac{M}{12}(W^2 + D^2)$; J_m – момент инерции двигателя, n – передаточное соотношение редуктора.

$$E_p = mgz_l + mgz_r + Mgz_b.$$

Вводим обобщенные координаты θ, ψ, ϕ для вычисления обобщенных сил:

$$F_\theta = \frac{\alpha}{2}(v_l + v_r) - (\beta + f_w)\dot{\theta} + \beta\dot{\psi}, \quad F_\psi = -\alpha(v_l + v_r) + 2\beta\dot{\theta} - 2\beta\dot{\psi},$$

$$F_\phi = \frac{R}{W}\alpha(v_r - v_l) - (\beta + \frac{W}{R}f_w)\dot{\phi}.$$

Рассмотрим два вектора состояния x_1 и x_2 по вертикальной и горизонтальной плоскостям и вектор управления напряжением привода u .

$$x_1 = [\theta, \psi, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T, \quad x_2 = [\phi, \dot{\phi}]^T, \quad u = [U_l, U_r]^T.$$

Следовательно, мы можем вывести уравнение состояния для сегвея в виде двухканальной системы управления:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = A_1x_1 + B_1u, \\ \dot{x}_2 = A_2x_2 + B_2u, \end{cases}$$

где A_1, B_1, A_2, B_2 – матрицы состояния и управления первого и второго векторов состояния:

$$A_1 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{MgLE}{\det(E)} & -\frac{(\beta + f_w)E + 2\beta E}{\det(E)} & \frac{3\beta E}{\det(E)} \\ 0 & \frac{MgLE}{\det(E)} & \frac{(\beta + f_w)E + 2\beta E}{\det(E)} & -\frac{\beta(\frac{E}{2} + 2E)}{\det(E)} \end{vmatrix};$$

$$B_1 = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{\alpha(ML^2 + J_\psi + 2n^2 J_m)}{2} + MLR - 2n^2 J_m & \frac{\alpha(ML^2 + J_\psi + 2n^2 J_m)}{2} + MLR - 2n^2 J_m \\ \frac{\alpha(ML^2 + J_\psi + 2n^2 J_m)}{2} + MLR - 2n^2 J_m & \frac{\alpha(ML^2 + J_\psi + 2n^2 J_m)}{2} + MLR - 2n^2 J_m \\ \frac{-\alpha(ML^2 + J_\psi + 2n^2 J_m)}{2} + MLR - 2n^2 J_m & \frac{-\alpha(ML^2 + J_\psi + 2n^2 J_m)}{2} + MLR - 2n^2 J_m \\ \frac{-\alpha(ML^2 + J_\psi + 2n^2 J_m)}{2} + MLR - 2n^2 J_m & \frac{-\alpha(ML^2 + J_\psi + 2n^2 J_m)}{2} + MLR - 2n^2 J_m \end{vmatrix};$$

$$A_2 = \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \beta + \frac{W}{R} f_w \\ 0 & -\frac{mW^2}{2} + J_\phi + \frac{W^2}{2R^2}(J_w + n^2 J_m) \end{vmatrix};$$

$$B_2 = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ \frac{R}{W}\alpha & \frac{R}{W}\alpha \\ \frac{mW^2}{2} + J_\phi + \frac{W^2}{2R^2}(J_w + n^2 J_m) & \frac{mW^2}{2} + J_\phi + \frac{W^2}{2R^2}(J_w + n^2 J_m) \end{vmatrix},$$

$$\text{где } \det(E) = \begin{vmatrix} (2m + M)R^2 + 2J_w + 2n^2 J_m & MLR - 2n^2 J_m \\ MLR - 2n^2 J_m & ML^2 + J_\psi + 2n^2 J_m \end{vmatrix}.$$

Выходами системы являются углы поворота вала двигателей $\theta_{m_l}, \theta_{m_r}$ и угловая скорость наклона маятника $\dot{\psi}$. Используя значения углов $\theta_{m_l}, \theta_{m_r}$, можно оценить углы поворота θ и ϕ , а проинтегрировав угловую скорость $\dot{\psi}$, можно оценить угол наклона маятника ψ .

Рассмотренная задача стабилизации позволяет при различных воздействиях на неустойчивую систему, например, при добавлении

дополнительной массы на платформу, удерживать ее вертикально. В этом заключается задача адаптивности системы управления.

Датчиком отклонения в сегвей служит модуль трёхосевого гироскопа и акселерометра *10 DOF IMU Sensor*, который обменивается с микроконтроллером по *I2C* шине. «Сырые» данные приходят на контроллер типа *Arduino Leonardo* по *I2C*, где они обрабатываются и по трёхпроводному интерфейсу поступают на драйвер *Motor Shield L298P* для электродвигателей. Скорости обмена хватает для запроса данных из модуля и балансирования платформой. Управление скоростью подаётся в виде ШИМ-сигнала на два электродвигателя с дифференциальным приводом для отработки отклонения от вертикали.

Разработка адаптивного нечёткого регулятора. Существующие системы управления сегвей построены на классических законах управления, т.е. на П-, ПИ-, ПИД-регуляторах и нашли своё применение в популярных изделиях. Изучая существующие решения, пришла идея сравнения классических регуляторов с нечёткими регуляторами. В качестве преимущества нечеткого регулирования можно отметить наличие современных систем программирования ПЛК со встроенными библиотеками нечеткого управления, имеющих хороший графический интерфейс (*MatLab, SciLab, Fuzzy Logic Toolbox*). Следовательно, упрощается и настройка системы автоматического регулирования [13].

Нечеткий регулятор представляет собой объединение на некоторой элементной базе трех блоков фаззи-управления: фаззификации, логического заключения и дефаззификации [14].

В результате сравнения классических и нечётких алгоритмов управления были сделаны следующие выводы:

1. Система с фаззи-алгоритмом не линейна и вид переходных процессов в автоматической системе регулирования зависит от формы и размера возмущающего воздействия.

2. При малых, ограниченных по модулю и скорости изменения значениях сигнала рассогласования, нечеткий и классический ПИ-алгоритмы в динамическом отношении эквивалентны.

3. При превышении сигналом рассогласования или его приращення пределов нормированного диапазона проявляется эффект насыщения – фаззи-алгоритм становится существенно нелинейным.

4. Система с нечетким регулятором превосходит систему с ПИ-регулятором по быстрдействию. Динамическая ошибка системы

с нечетким регулятором незначительно отличается от динамической ошибки системы с ПИ-регулятором.

Таким образом, нечеткое регулирование превосходит традиционное по ряду характеристик.

Нечеткие регуляторы могут использоваться как для регулирования параметров процесса, так и в составе традиционных ПИ- и ПИД-регуляторов для улучшения их характеристик.

Из анализа следует, что нужно использовать неклассический метод управления двигателями, так как он лучше классического метода по ряду характеристик, и к тому же такой вид управления моделью «сегвей» ранее не применялся в реализованных моделях, что является новым в данной разработке.

Разработана библиотека, реализующая функционал нечёткой логики, позволяющая применить ее для балансирующей платформы на базе контроллера типа *Arduino*.

Недостатком нечеткого регулятора является отсутствие адаптации к внешним возмущениям. Поэтому рассмотрим адаптивный нечеткий регулятор.

На рис. 3 приведена структура адаптивного нечеткого регулятора, включающая адаптивный нейронный фаззификатор и блок активационных функций.

Математическое описание адаптивного нечеткого регулятора включает фаззификацию на нейронной основе:

$$y_1 = \frac{1}{1 + \exp(-w_1(x + w_{c1}))};$$

$$y_2 = \frac{1}{1 + \exp(-w_2(x + w_{c2}))} - \frac{1}{1 + \exp(-w_3(x - w_{c3}))};$$

$$y_3 = \frac{1}{1 + \exp(-w_4(x + w_{c4}))} - \frac{1}{1 + \exp(-w_5(x - w_{c5}))};$$

$$y_4 = \frac{1}{1 + \exp(-w_6(x + w_{c6}))} - \frac{1}{1 + \exp(-w_7(x - w_{c7}))};$$

$$y_5 = \frac{1}{1 + \exp(-w_8(x - w_{c8}))},$$

где w_{ci} – параметры смещения сигмоидных ФП; w_i – вес суммарного сигнала на входе сигмоидных ФП; y_i – активизированные степени принадлежности фаззификатора синглетону, синхронно связанному со входом x .

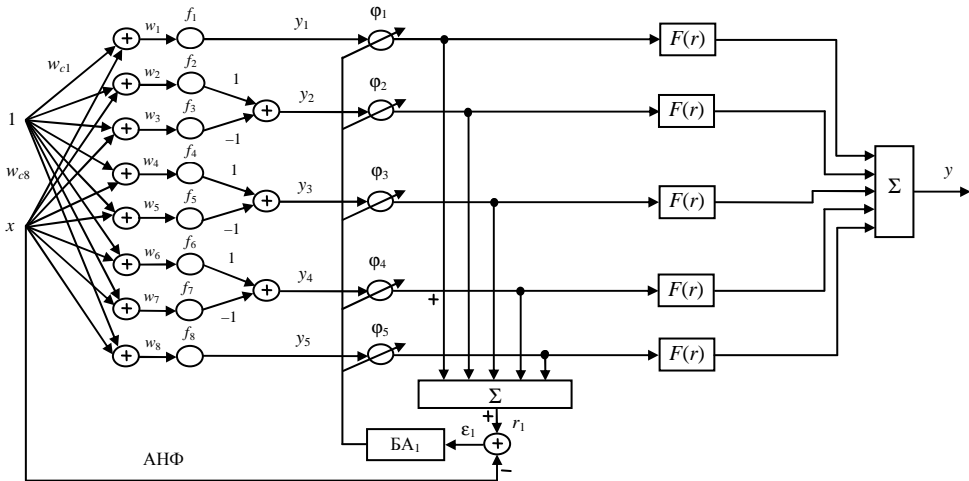


Рис. 3. Структура адаптивного нечеткого регулятора

Алгоритм обучения искусственного нейрона адаптивного нейронного фаззификатора выполнен с применением рекуррентной формулы

$$h_{j+1} = h_j + (x_j - x_{ju}) \frac{u_j}{u_j^T u_j},$$

где h_{j+1} – последующий шаг $j+1$ -итерации; h_j – предыдущий шаг j -итерации; x_j – дискретная форма j -итерации; x_{ju} – оценка выхода модели; $(x_j - x_{ju})$ – ошибка в оценке x_j ; u_j – измеряемая функция; T – транспонирование.

В качестве активационных функций блока активационных функций принят смещенный сигмоид:

$$F(r) = \frac{1}{1 + e^{-rx}},$$

где с уменьшением параметра r смещенный сигмоид становится более пологим, в пределе при условии $r = 0$ вырождаясь в горизонтальную линию на уровне 0,5, а при увеличении r смещенный сигмоид

приближается по внешнему виду к функции единичного скачка с переключением в точке $x = 0$.

На данном этапе реализована физическая модель «сегвей» с интегрированным в контроллер *Arduino Leonardo* адаптивным нечётким регулятором.

В перспективе планируются реализация движения сегвей в направлениях, отличных от направления «вперёд», реализация удалённого управления сегвей через *Bluetooth*-интерфейс и переход на модель реального масштаба.

Выводы

1. Разработаны математическое описание системы «сегвей» с помощью функции Лагранжа, а также микропроцессорная система управления на базе контроллера *Arduino Leonardo*.

2. Разработан адаптивный нечеткий регулятор, где фаззификатор реализован на нейронах, а адаптация достигается с помощью нейрона с последовательным обучением.

3. Выявлены пути дальнейших исследований для повышения интеллектуальных возможностей системы «сегвей».

Библиографический список

1. Деменков Н.П. Нечеткое управление в технических системах. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005.

2. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006.

3. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: Физматлит, 2001. – 221 с.

4. Yamamoto Y. NXTway-GS Model-Based Design // *Cybernet Systems*. – 2009. – URL: <https://www.arduino.cc/en/Reference/Libraries> (дата обращения: 04.02.16).

5. Rasmus H. Nustromi, Hannu T. Toivonen, Kati V. Sandstrom. Internal model control of nonlinear systems described by velocity-based linearizations // *Journal of Process Control*. – 2003. – № 13. – P. 215–224.

6. A Mobile, Inverted pendulum / F. Grasser, A. D'Arrigo, S. Colombi, A. Rufer // *Laboratory of Industrial Electronics, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, EPFL, CH-1015*. – Lausanne, Switzerland, 2000.

7. Певзнер Л.Д., Чураков Е.П. Математические основы теории систем. – М.: Высшая школа, 2009.
8. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.
9. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLab. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007.
10. Хижняков Ю.Н. Современные проблемы теории управления. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – 237 с.
11. Хижняков Ю.Н. Нечеткое, нейронное и гибридное управление: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 303 с.
12. Хижняков Ю.Н., Южаков А.А. Нейронечеткий регулятор частоты газотурбинного двигателя // Приборы. – 2010. – № 5. – С. 17–21.
13. Гроп Д. Методы идентификации систем. – М.: Мир, 1976. – С. 5–9.
14. Леготкина Т.С., Данилова С.А. Методы идентификации систем. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – С. 48–50.

References

1. Demenkov N.P. Nechetkoe upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh [Fuzzy control in engineering systems]. Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana, 2005.
2. Rutkovskaia D., Pilin'skii M., Rutkovskii L. Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow: Goriachaia liniia-Telekom, 2006.
3. Kruglov V.V., Dli M.I., Golunov R.Iu. Nechetkaia logika i iskusstvennye neironnye seti [Fuzzy logic and artificial neural networks]. Moscow: Fizmatlit, 2001. 221 p.
4. Yamamoto Y. NXTway-GS Model-Based Design. *Cybernet Systems*, 2009, available at: <https://www.arduino.cc/en/Reference/Libraries> (accessed 04. February 2016).
5. Rasmus H. Nustromi, Hannu T. Toivonen, Kati V. Sandstrom. Internal model control of nonlinear systems described by velocity-based linearizations. *Journal of Process Control*, 2003, no. 13, pp. 215-224.

6. Grasser F., D'Arrigo A., Colombi S., Rufer A. A Mobile, Inverted pendulum. Laboratory of Industrial Electronics, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, EPFL, CH-1015. Lausanne, Switzerland, 2000.

7. Pevzner L.D., Churakov E.P. *Matematicheskie osnovy teorii sistem* [Mathematical bases of the theory systems]. Moscow: Vysshaia shkola, 2009.

8. Mirosnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. *Nelineinoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami* [Non linear and complex dynamic system adaptive management]. Saint Peterburg: Nauka, 2000. 549 p.

9. Shtovba S.D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MatLab* [Designing fuzzy systems by means of MatLab]. Moscow: Goriachaia liniia–Telekom, 2007.

10. Khizhniakov Iu.N. *Sovremennye problemy teorii upravleniia* [Modern problems of the management theory]. Permckii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2015. 237 p.

11. Khizhniakov Iu.N. *Nechetkoe, neironnoe i gibridnoe upravlenie* [Fuzzy, neural and hybrid control]. Permckii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2013. 303 p.

12. Khizhniakov Iu.N., Iuzhakov A.A. *Neironechetkii regulator chastoty gazoturbinnogo dvigatel'ia* [Neurons-fuzzy frequency monitor]. *Pribory*, 2010, no. 5, pp. 17-21.

13. Grop D. *Metody identifikatsii sistem* [System identification method]. Moscow: Mir, 1976, pp. 5-9.

14. Legotkina T.S., Danilova S.A. *Metody identifikatsii sistem* [System identification method]. Permckii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2008, pp. 48-50.

Сведения об авторах

Липатников Никита Георгиевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: lipatnikovnikita91@yandex.ru).

Корнилков Антон Николаевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: 89824947721@yandex.ru).

Хижняков Юрий Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры автоматике и телемеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: Luda@at.pstu.ru).

About the authors

Lipatnikov Nikita Georgiyevich (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: lipatnikovnikita91@yandex.ru).

Kornilkov Anton Nikolaevich (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: 89824947721@ yandex.ru).

Hizhnyakov Yury Nikolaevich (Perm, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Automation and Telemechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: Luda@at.pstu.ru).

Получено 14.07.2016