

4. *Форсайт Дэвид А., Понс Жан.* Компьютерное зрение. Современный подход: Пер. с англ. – М., 2004. – 928 с.
5. *Гузик В.Ф., Чумаченко А.В.* Статистический метод оптимизации локальных алгоритмов установления пиксельных соответствий на стереопарах // Известия высших учебных заведений Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 4. – С. 20-25.
6. *Scharstein D. and Pal C.* Learning conditional random fields for stereo // In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2007), Minneapolis, MN, June 2007. URL: <http://vision.middlebury.edu/stereo/data> (дата обращения 2013.12.30).
7. *Hirschmüller H. and Scharstein D.* Evaluation of cost functions for stereo matching // In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2007), Minneapolis, MN, June 2007. URL: <http://vision.middlebury.edu/stereo/data> (дата обращения 2013.12.30).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.И. Витиска.

Гузик Вячеслав Филиппович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: vfguzik@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, Энгельса, 1; тел.: 88634371428, 89064287987; кафедра вычислительной техники; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Чумаченко Александр Викторович – e-mail: alex_chumachenko@mail.ru; тел.: +79281554935; кафедра вычислительной техники; аспирант.

Guzik Vyacheslav Filippovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: vfguzik@sfedu.ru; 1, Engels, Taganrog, 347928, Russia; phones: +78634371428, +79064287987; the department of computer engineering; head the department; dr. of eng. sc.; professor.

Chumachenko Aleksandr Victorovich – e-mail: alex_chumachenko@mail.ru; phone: +79281554935; the department of computer engineering; postgraduate student.

УДК 620.9:519.711

В.В. Соловьев, О.В. Косенко

АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АДАПТИВНОГО НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА*

В работе описан принцип функционирования системы управления с адаптивным нечетким регулятором, содержащей эталонную модель, объект управления, блок адаптации и нечеткий регулятор. Показан механизм заполнения пустой базы правил в режиме нормального функционирования объекта управления, связанный с изменением положения центров функций принадлежности выходного сигнала регулятора в зависимости от сигнала рассогласования выхода эталонной модели и объекта управления. Приведен механизм определения активных правил регулятора, обусловленный сочетанием активных функций принадлежности лингвистических переменных. Выполнена характеристика масштабных коэффициентов регуляторов и определены их величины в зависимости от амплитуды входных и выходных сигналов регулятора. Приведены этапы алгоритма функционирования адаптивного нечеткого регулятора. Показаны выражения для реализации лингвистических переменных входных и выходных сигналов регулятора. Приведено определение первоначальной базы правил и определены модули подпрограмм алгоритма нечеткого логического вывода, допускающие реализацию с применением популярных языков программирования. Раз-

* Материалы статьи подготовлены в рамках выполнения работ по гранту Российского научного фонда № 14-19-01533

работана блок-схема алгоритма функционирования адаптивного нечеткого регулятора содержащая этапы фаззификации входных сигналов ошибки и ее производной, модификации базы правил регулятора для правил с активными посылками, дефаззификации результата.

Структура адаптивного нечеткого регулятора, этапы алгоритма нечеткого логического вывода, механизм адаптации нечеткого регулятора.

V.V. Soloviev, O.V. Kosenko

FUNCTIONING ALGORITHM ADAPTIVE FUZZY CONTROLLER

In work is described the principle of functioning a control system with the adaptive fuzzy controller, containing reference model, object of control, the block of adaptation and the fuzzy regulator. The mechanism of filling blank rule base is shown in a mode of normal functioning object, associated with change of position the centers membership functions of the controller output, depending on the error signal output of the reference model and object of control. The mechanism of definition active rules the regulator is given, due to a combination of the active membership functions linguistic variables. Performed scale factors characteristic of the regulators and their values are determined depending on the amplitude of the input and output signals of the controller. Stages of algorithm functioning the adaptive fuzzy controller are given. Expressions are shown for the implementation of linguistic variables input and output signals of the controller. Definition of initial rule base is given and modules of subprogrammes algorithm of the fuzzy logical conclusion are defined, allowing realization with application of popular programming languages. The flowchart is realized of algorithm functioning the adaptive fuzzy regulator containing stages of a fuzzification input error signal and its derivative, modification rule base of the regulator is developed for active rules.

Structure of the adaptive fuzzy controller, stages of algorithm fuzzy logical conclusion, mechanism of adaptation fuzzy controller.

Введение. Одной из проблем современной науки, является разработка методов исследования и построения систем управления сложными динамическими объектами и процессами в условиях неопределенности. Примерами подобных технических систем могут служить системы управления технологическими процессами на металлургических, химических предприятиях, на электростанциях, где сложность физических и химических реакций и их многообразие не поддаются строгому описанию.

Для построения точного математического описания с целью решения задач управления сложной системой требуется большой объем априорной информации. Большая размерность и сложность математической модели, построенной с использованием всего объема априорной информации, может свести на нет все попытки эффективного достижения цели управления за счет больших экономических и временных затрат. С другой стороны, упрощенное математическое описание, может привести к неадекватности получаемых управляющих воздействий, вследствие недостаточности полного учета факторов неопределенности.

Наиболее эффективными методами, позволяющими обеспечить требуемое качество управления объектами в условиях неполноты данных, являются методы адаптивного управления [1–3]. К сожалению, большинство методов классической теории управления применяются для объектов у которых математическая модель задана с точностью до параметров.

Системы управления с нечеткими регуляторами обладают большей робастностью, по сравнению с системами с традиционными регуляторами [4]. Многообразие параметров нечетких регуляторов, позволяет разработать большое количество методов их адаптации. Одним из перспективных, является метод, основанный, на модификации положения функций принадлежности лингвистической перемен-

ной выходного сигнала регулятора, позволяющий реализовать прямое адаптивное управления техническим объектом [5, 6], с небольшим объемом экспертных знаний. Данная работа посвящена разработке блок-схемы алгоритма адаптивного нечеткого регулятора для объектов с априорной неопределенностью.

Принцип работы системы управления. Структура системы управления с адаптивным нечетким регулятором (АНР) приведена на рис. 1 [7]. Исследуемая система представляет собой адаптивную систему управления с эталонной моделью (ЭМ).

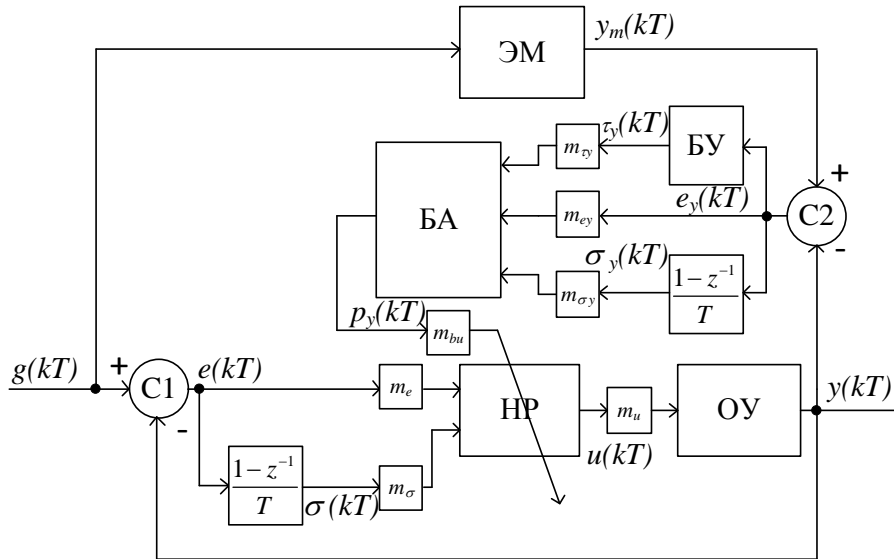


Рис. 1. Структура системы управления с АНР: НР – нечеткий регулятор; БА – блок адаптации; ОУ – объект управления; ЭМ – эталонная модель; C1, C2 – сравнивающие элементы; БУ – блок усреднения ошибки

Рассмотрим принцип функционирования системы управления. Задающее воздействие $g(kT)$ поступает на вход ЭМ и на вход сравнивающего элемента (C1) основного контура управления. На выходе ЭМ формируется ее реакция $y_m(kT)$. На выходе сравнивающего элемента (C2) формируется сигнал ошибки $e_y(kT)$, как расхождение между выходным сигналом $y_m(kT)$ ЭМ и выходным сигналом $y(kT)$ объекта управления (ОУ). По сигналу ошибки $e_y(kT)$ рассчитывается ее производная $\sigma_y(kT)$ и средняя ошибка $\tau_y(kT)$ за m отсчетов в блоке усреднения (БУ). После масштабирования (m_{e_y} , m_{σ_y} , m_{τ_y}) сигналы поступают на вход блока адаптации (БА), где производится расчет параметра адаптации p_y .

Параметр адаптации p_y представляет собой величину сдвига функций принадлежности выходного сигнала НР. В НР выполняется фаззификация сигнала ошибки e и ее производной σ . В пустой базе правил ищутся правила (далее активные правила), посылки которых включают сочетания активных ФП, т.е.

$$\mu_i(e(kT), \sigma(kT)) > \eta,$$

где η ($0 \leq \eta \leq 1$) - параметр, который определяет "грубость" операции агрегирования.

Для активных правил выполняется сдвиг ФП выходного сигнала НР. Рассчитываются координаты центров $c_j(kT)$ функций принадлежности выходного сигнала в момент времени kT для активных заключений в соответствии с выражением

$$c_j(kT) = c_j(kT - T) + \psi \cdot p_u(kT),$$

где $c_j(kT-T)$ – центры функций принадлежности активных заключений на предыдущем такте; ψ - модификатор величины сдвига.

Таким образом, выполняется заполнение базы правил и определение положения ФП выходного сигнала НР в режиме нормального функционирования ОУ.

БУ используется в структуре адаптивной системы для уменьшения рассогласования выходного сигнала объекта управления и эталонной модели. В БУ рассчитывается средняя ошибка за m отсчетов.

Для обеспечения эффективного управления необходимо изменять входные и выходные сигналы НР и БА с использованием масштабных коэффициентов таким образом, чтобы сигналы целиком отображались на универсальные множества. Заранее можно определить масштабные коэффициенты m_{pu} и m_u . Коэффициент m_{pu} устанавливается таким образом, чтобы сдвиг ФП не превышал размера универсального множества для выходного сигнала в НР. Коэффициент m_u выбирается в зависимости от величины допустимых управляющих воздействий на ОУ. Величина m_e устанавливается равная обратной величине максимальной амплитуды задающего воздействия не зависимо от его вида.

Алгоритм функционирования адаптивного нечеткого регулятора. Алгоритм функционирования регулятора основного контура содержит этапы:

- ◆ определение параметров лингвистических переменных;
- ◆ определение исходной базы правил;
- ◆ определение масштабных коэффициентов;
- ◆ фаззификация;
- ◆ модификация базы правил и нечеткий вывод;
- ◆ дефаззификация.

Треугольные функции принадлежности можно определить последовательно по координат вершин и шириной основания [8]:

- ◆ для входных лингвистических переменных

при заданном универсальном множестве R_e , ЛП "ошибка для НР" $e_c = [c_1 c_2 \dots c_{n-1} c_n]$,

где $c_1 = \min(R_e)$, $c_n = \max(R_e)$, $w_e = \frac{|c_n| + |c_1|}{0,5 \cdot (n-1)}$ (w_e – ширина основания функции при-

надлежности), $c_i = c_{i-1} + 0,5w_e$ ($i=2, 3, \dots, n-1$);

при заданном универсальном множестве R_σ , ЛП "производная ошибки для НР" $\sigma_c = [c_1 c_2 \dots c_{m-1} c_m]$,

где $c_1 = \min(R_\sigma)$, $c_m = \max(R_\sigma)$, $w_\sigma = \frac{|c_m| + |c_1|}{0,5 \cdot (m-1)}$, $c_i = c_{i-1} + 0,5w_\sigma$ ($i=2, 3, \dots, m-1$).

- ◆ для выходной лингвистической переменной

при заданном универсальном множестве R_u , ЛП "управляющее воздействие" $u_c = [c_1 c_2 \dots c_{r-1} c_r]$, $r = n \times m$,

где $c_i = c_j = 0$, $i, j = [1, 2, \dots, r]$, $w_u = \frac{|\max(R_u)| + |\min(R_u)|}{0,5 \cdot (r-1)}$.

Таким образом, исходная база правил регулятора массив $Fr_{n \times m} = [0]$, который заполняется в процессе управления.

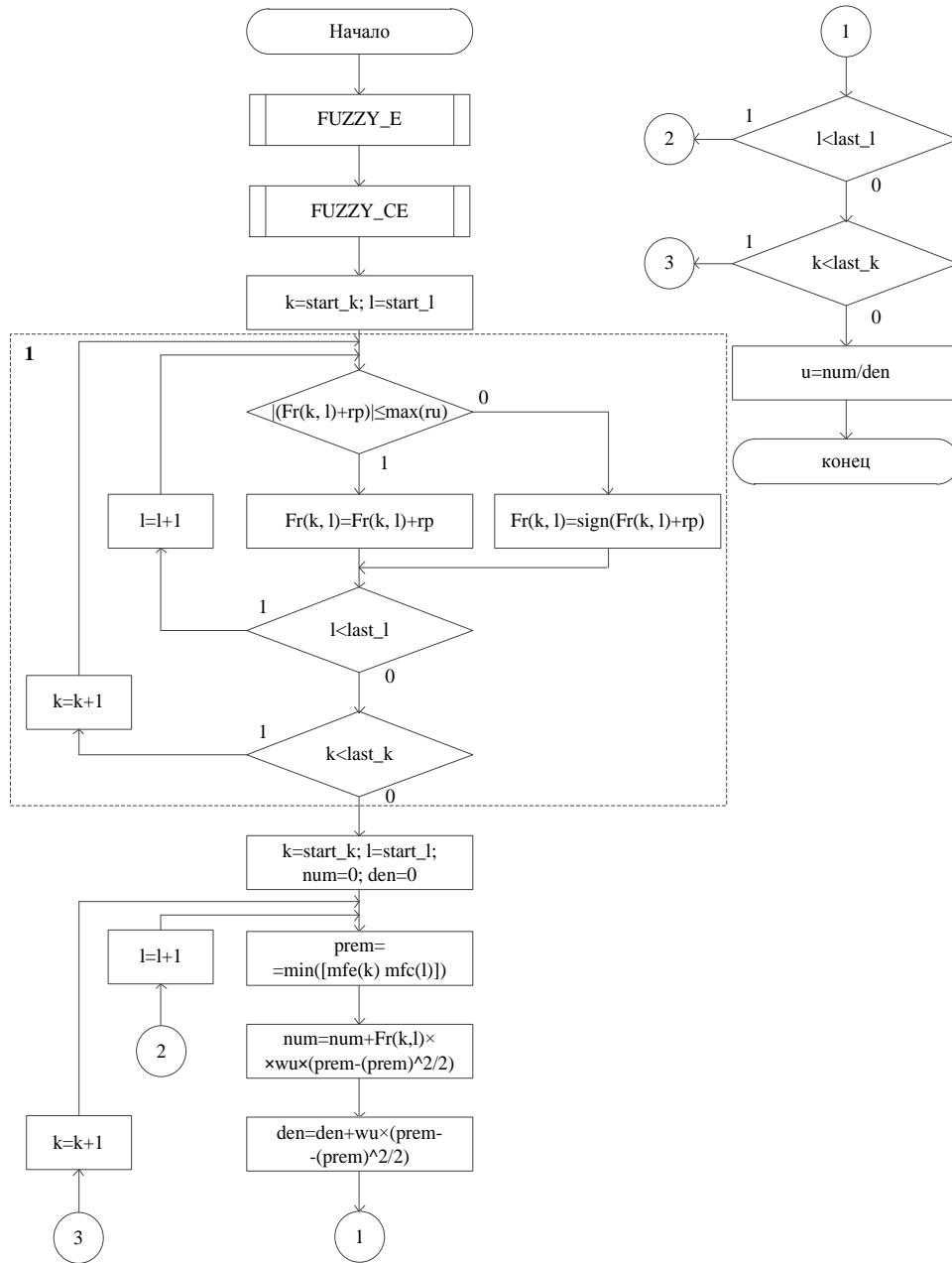


Рис. 2. Алгоритм адаптивного нечеткого регулятора

Блок-схема алгоритма адаптивного нечеткого регулятора показана на рис. 2. В нем введены обозначения: FUZZY_E, FUZZY_CE – подпрограммы фаззификации сигнала ошибки и ее производной; start_k, start_l и last_k, last_l – начальные и конечные элементы массивов степени принадлежности сигнала ошибки и ее производной; Fr – массив правил; num, den – числитель и знаменатель формулы дефаззификации.

В модуле 1 производится модификация базы правил регулятора для активных посылок. Если при модификации положение функции принадлежности выходного сигнала попадает за границы универсального множества, то в массив правил заносится граничное значение положения.

Приведенный алгоритм может быть реализован с использованием большинства языков программирования. Авторами алгоритм реализован в среде MatLab в виде m-файла. Исследования функционирования АНР выполнялись на стенде, в качестве объекта управления в котором использован маломощный двигатель постоянного тока [9, 10]. В результате установлено, что данным объектом можно удовлетворительно управлять в реальном режиме времени с шагом дискретизации 10 мс. Небольшой объем программного кода открывает возможность реализации алгоритма на базе современных микроконтроллеров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никифоров В.О., Слита О.В., Ушаков А.В. Интеллектуальное управления в условиях неопределенности: учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. – 226 с.
2. Tao, Gang. Adaptive control design and analysis. Wiley-IEEE Pres, 2003. - P. 640.
3. Антонов В.Н., Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Адаптивное управление в технических системах: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 2001. – 244 с.
4. Деменков В.М. Нечеткое управление в технических системах: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – 200 с.
5. Passino, Kevin M. Fuzzy control. Addison Wesley Publishing Company. 1997.
6. Zakky A., Arief S. Rancang Bangun Pengendali Kecepatan Turbin Berbasis Fuzzy Model Reference Learning Control // Jurnal Sarjana Institut Teknologi Bandung bidang Teknik Elektro dan Informatika. – April 2012. – Vol. 1, Num. 1. – P. 156-160.
7. Соловьев В.В., Финаев В.И. Синтез систем адаптивного управления для многосвязных объектов с нечеткими параметрами // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 1 (45). – С. 117-125.
8. Зайченко Ю.П., Заец И.О., Камоцкий О.В., Павлюк О.В. Исследование разных видов функций принадлежности параметров нечетких прогнозирующих моделей в нечетком методе группового учета аргументов // Управляющие системы и машины. – 2003. – № 2. - С. 1-15.
9. Соловьев В.В., Скубилин М.Д. Разработка нечеткого регулятора для двигателя постоянного тока // Вопросы специальной радиоэлектроники//Научно-технический сборник. Вып. 3. - Таганрог: ТНИИС, 2010. – С. 130-139.
10. Соловьев В.В., Финаев В.И. Адаптивный нечеткий регулятор для двигателя постоянного тока // Системный анализ, управление и обработка информации: Труды 1-го Международного семинара студентов, аспирантов и ученых / Под общ. ред. Р.А. Нейдорфа. – Ростов-на-Дону: Изд. Центр Донск. гос. техн. ун-та, 2010. – С. 164-169.

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

Соловьев Виктор Владимирович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: soloviev-tti@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления; ст. преподаватель.

Косенко Олеся Валентиновна – e-mail: o_kosenko@mail.ru; 347900, г. Таганрог, 13 переулоч, 6; тел.: 88634649741; кафедра систем автоматического управления; ассистент.

Soloviev Victor Vladimirovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: soloviev-tti@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; senior lecturer.

Kosenko Olesya Valentinovna – e-mail: o_kosenko@mail.ru; 6, 13 pereulok, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634649741; the department of automatic control systems; assistant.