

УДК 621.311

А.С. Луговской, В.С. Никулин, Т.С. ЛеготкинаПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
В ПАКЕТЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ SCADE SUITE**

В настоящее время все более актуальным становится исследование (эталонных) сигналов нейронных сетей, которые управляют объектом. В нашей статье производится исследование и рассматривается процедура отбора и проверки определенного проектного решения, модель которого может быть использована как основа для разработки частных методик, а также рассматриваются вопросы исследования систем с нейронечетким управлением. В представленной авторами статье на конкретных примерах приведена структурная схема системы исследования, представлены схемы на языке пакета SCADE Suite отдельных элементов системы управления, а также полная система исследования с результатами моделирования. В разработанной структуре исследования был проверен метод адаптации. Этот метод называется: «Метод обучения с моделью». Для исследования системы нейронечеткого управления собрана отдельная система. На этой модели можно исследовать системы управления с обратной связью по ошибке, по первой и второй производным для разных методов адаптации и разных активационных функций. На основе анализа структура представленной модели позволяет провести полное исследование нейронечетких систем управления для любых объектов, используя различные сигналы обратных связей (обратная связь по ошибке, по первой и по второй производным от ошибки), и дает различные способы их подключения, а активационные блоки позволяют строить в соответствии с различными активационными функциями. По завершении обучения нейронные сети становятся незаменимым средством решения задач распознавания образов, аппроксимации, оптимизации, векторного квантования либо классификации.

Ключевые слова: моделирование, система, фазсификация, активационные функции, блок адаптации, система моделирования SCADE SUITE.

A.S. Lugovskoy, V.S. Nikulin, T.S. Legotkina

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**STUDY NEURAL CONTROL SYSTEMS IN SIMULATION
PACKAGE SCADE SUITE**

At the present time is becoming increasingly important research (reference) signals neural networks that can learn to control the object. This article made a study and the procedure for the selection and validation lennogo-defined project design, a model of which can be used as a basis for the development of individual techniques and examines the study of systems with neuro-fuzzy control. In the present article, the authors of specific examples is a block diagram of the study are presented in the language scheme pas chum SCADE Suite individual elements of the management system, as well as a complete system IC route with simulation results. In the proposed structure of the study were tested two methods of adaptation. This method is called stochastic, as well as a method of training the model. For the study of neuro-fuzzy control system is collected separately. In this model system to investigate the

feedback control by mistake, the first and second derivatives for different methods of adaptation and different activation functions. Based on the analysis, the structure of the Universe-representation model allows to carry out a full investigation of the neuro-fuzzy control systems for any objects using a variety of feedback signals (on-feedback by mistake, on the first and second derivative of the error) and enables various-WIDE ways to connect and activation units built in compliance with various governmental-activation functions. Upon completion of training neural networks are indispensable tools for solving problems of pattern recognition, approximation optimization, vector quantization or classification.

Keywords: modeling, system, fuzzification, activation function, adaptation unit, system modeling SCADE SUITE.

Объединение элементов нечеткой логики (фаззификация) и нейронной сети позволяет исключить недостатки нечеткой логики и проектировать адаптивные нечеткие регуляторы [1]. По сравнению с традиционными методами анализа нечеткое управление с применением нейронной технологии позволяет проводить анализ задачи и получать результаты с заданной точностью, обеспечивать значительное повышение быстродействия процессов управления при использовании нейро-нечетких контроллеров и создания систем управления для объектов, где нецелесообразно применять методы традиционной математики [2, 3].

Все системы с нечеткой логикой функционируют по одному принципу: показания измерительных приборов (статистики) фаззифицируются (переводятся в нечеткий формат), обрабатываются (разрабатываются правила вывода), дефаззифицируются (в виде привычных сигналов подаются на исполнительные устройства).

При фаззификации производится преобразование четких величин, измеренных на выходе объекта управления, в нечеткие величины, описываемые лингвистическими переменными в базе знаний. Фаззификация включает в себя:

- определение входов и выходов системы;
- задание для каждой из входных и выходных функций принадлежности (терм).

На этапе фаззификации разрабатываются продукционные правила, связывающие лингвистические переменные. Совокупность таких правил описывает стратегию управления, применяемую в конкретной задаче. Процесс вычисления нечеткого правила подразделяется на два этапа: обобщение и заключение.

К недостаткам нечеткого управления можно отнести высокую сложность системы правил для получения выходных сигналов для дефаззификации, особенно в случае, когда в системе требуется введение нескольких обратных связей (больше двух).

Объединение элементов нечеткой логики (фаззификация) и нейронной сети позволяет исключить недостатки нечеткой логики и про-

ектировать адаптивные нечеткие регуляторы [4, 6]. По сравнению с традиционными методами анализа нечеткое управление с применением нейронной технологии позволяет проводить анализ задачи и получать результаты с заданной точностью, обеспечивать значительное повышение быстродействия процессов.

Исследование систем проведено с помощью комплекта программ SCADA SUITE. Компания Esterel Technologies [5] создала среду разработки SCADA для получения законченных решений разработчиками прикладного программного обеспечения встроенных систем.

Комплект программ SCADA Suite – это набор инструментов (tool-chain) для разработки прикладного программного обеспечения систем управления, интеграционную роль в которых играет собственный (native) язык Scade. Компоненты программ служат для создания проектов, моделирования и верификация проектов, генерации кода на Си и Ada, а также включают средства поддержки функциональной совместимости с инструментами моделирования других производителей.

Модуль SCADA System Designer – инструмент моделирования проектов систем на архитектурном уровне позволяет системным инженерам моделировать проекты системных компонент и структуры с использованием блок-диаграмм SysML. Исследуемая система (рис. 1) состоит из входного элемента сравнения ЭС1, фаззификатора, блока адаптации (блок коэффициентов Φ , сумматор $\Sigma 1$, элемент сравнения), активационного блока, представленного активационными функциями F_i и сумматором $\Sigma 2$, и объекта.

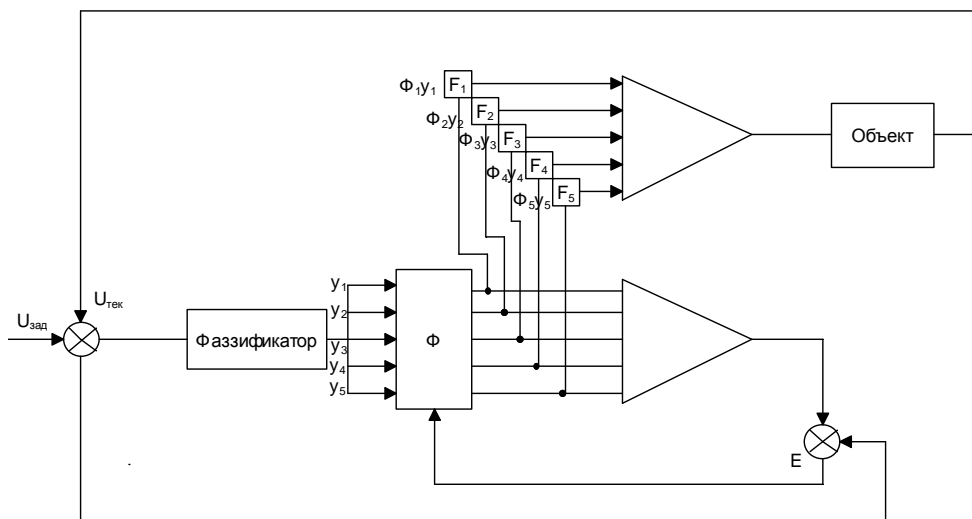


Рис. 1. Структура исследуемой системы

Фаззификатор представляет совокупность функций принадлежности (терм) [7, 8]. Выделяются области, соответствующие следующим диапазонам: отрицательное большое – ОБ, отрицательное среднее – ОС, норма – Н, положительное среднее – ПС, положительное большое – ПБ. Соответствующие этим диапазонам значения функции принадлежности (термы) обозначим y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 .

Сигнал ошибки $\Delta U = U_{\text{зад}} - U_{\text{тек}}$ поступает на фаззификатор, который описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} \text{ОБ:} & \left\{ \begin{array}{l} y_1 = 1; \Delta U < -a; \\ y_1 = -\frac{2}{a}\Delta U - 1; -a \leq \Delta U < -0,5a; \end{array} \right\}; \\ \text{ОС:} & \left\{ \begin{array}{l} y_2 = \frac{2}{a}\Delta U + 2; -a \leq \Delta U < -0,5a; \\ y_2 = -\frac{2}{a}\Delta U; -0,5a \leq \Delta U < 0; \end{array} \right\}; \\ \text{Н :} & \left\{ \begin{array}{l} y_3 = \frac{2}{a}\Delta U + 1; -0,5a \leq \Delta U < 0; \\ y_3 = -\frac{2}{a}\Delta U + 1; 0 \leq \Delta U < 0,5a; \end{array} \right\}; \\ \text{ПС:} & \left\{ \begin{array}{l} y_4 = \frac{2}{a}\Delta U; 0 \leq \Delta U < 0,5a; \\ y_4 = -\frac{2}{a}\Delta U + 1; 0,5a \leq \Delta U < a; \end{array} \right\}; \\ \text{ПБ:} & \left\{ \begin{array}{l} y_5 = \frac{2}{a}\Delta U - 1; 0,5a \leq \Delta U < a; \\ y_5 = 1; a \leq \Delta U; \end{array} \right\}. \end{aligned}$$

Параметр « a » определяется диапазоном изменения ΔU , например $a = 0,1$. Каждое значение ΔU возбуждает две термы фаззификатора, сумма этих сигналов для приведенной системы равна 1.

Далее сигналы с фаззификатора $y_i (i = 1,2,3,4,5)$ поступают на блок адаптации. Задача блока адаптации состоит в изменении коэффициентов (синапсов) нейрона Φ_i с целью обработки отклонения между выходом сумматора нейрона и сигналом ΔU , представляющим раз-

ность сигналов задания и выхода объекта. Алгоритм адаптации подстраивает коэффициенты Φ_i так, чтобы свести ошибку $E(k) = \Delta U - \sum \Phi_i y_i$ до некоторой заданной величины, например 10^{-3} . Далее произведение $\Phi_i y_i$ подается на активационный блок.

Были проверены два алгоритма адаптации.

В разработанной структуре исследования были проверены два метода адаптации. Это метод стохастической и метод обучения с моделью [9, 10].

Метод стохастической аппроксимации основан на рекуррентном соотношении

$$\Phi_i(k+1) = \Phi_i(k) + CE(k)y_i(k),$$

где $\Phi_i(k)$ – коэффициент нейрона для i -ГО входа на k -й итерации; $E(k)$ – ошибка управления, $E(k) = (\Delta U - \sum \Phi_i y_i)$; C – корректирующий коэффициент либо постоянная величина, либо его можно менять, представив в виде $C(k) = \frac{C}{k}$ (k – номер итерации).

Рассматриваемый метод стохастической аппроксимации как метод адаптации требует большого числа итераций (несколько десятков), что в условиях исследования в реальном времени нежелательно.

Меньшее число итераций при одинаковой заданной точности дает метод обучения с моделью, который снижает число итераций до 1–2, даже при достаточно высокой заданной точности (до 10^{-7}). Метод обучения строится также по рекуррентной формуле:

$$\Phi_i(k+1) = \Phi_i(k) + E(k)y_i(k) / \sum y_i^2.$$

Произведение $\Phi_i y_i$ подается на активационный блок F_i . Сумма сигналов с активационных блоков представляет сигнал управления объектом.

Рассмотрим структуру отдельных блоков системы (рис. 2).

Фаззификатор в системе SCADE предлагается выполнить отдельно для каждой ветви кривых принадлежности. Обозначим отдельные кривые следующим образом: LM – отрицательное большое, MML – отрицательное среднее левое, MMR – отрицательное среднее правое, NL – норма левая, NR – норма правая, MPL – положительное среднее левое, MPR – положительное среднее правое, BP – положительное

большое. Для примера в пакете SCADE представлена схема для ветви LM (отрицательное большое) (см. рис. 2). Для схемы приведены таблица истинности и график. Для упрощения реализации схема работает с целыми числами (int). В дальнейшем производится перевод в действительные числа (real).

Таблица истинности для схемы на рис. 3.

| X | y |
|-----|---|
| -10 | 5 |
| -9 | 4 |
| -8 | 3 |
| -7 | 2 |
| -6 | 1 |
| -5 | 0 |
| -4 | 0 |

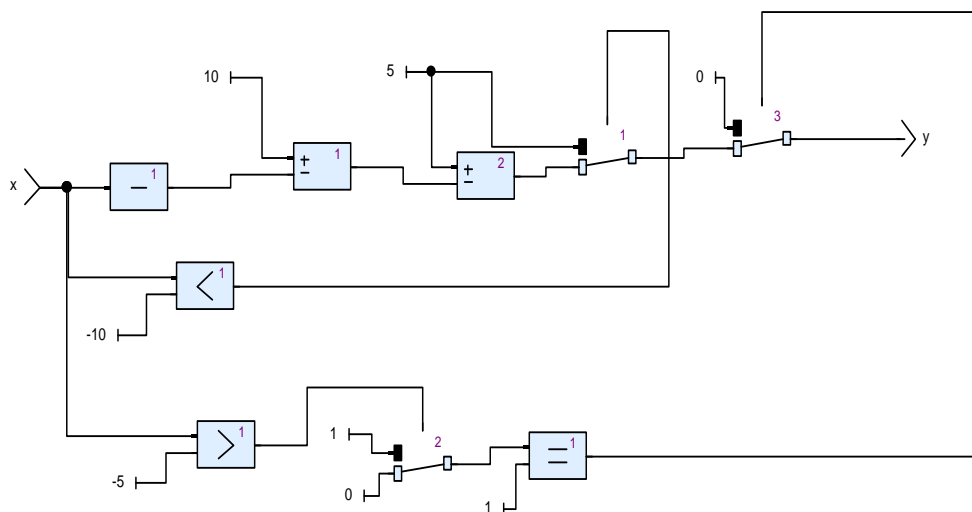


Рис. 2. Схема для ветви LM (отрицательное большое)

В качестве объекта возьмем, например, динамический объект, описываемый дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами. В зависимости от значений коэффициентов система может быть устойчивой или неустойчивой, а также с колебаниями и без колебаний

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + b_1 \frac{dy(t)}{dt} + b_0 y(t) = kx(t).$$

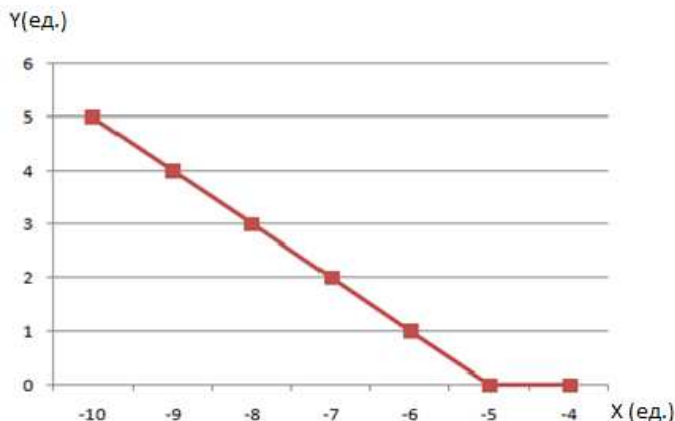


Рис. 3. График зависимости выхода от входа для схемы

Кроме того, должны быть начальные условия:

$$y(t_0) = \frac{dy(t_0)}{dt} = 0.$$

Для данного дифференциального уравнения можно записать передаточную функцию:

$$\frac{y(p)}{x(p)} = W(p) = \frac{k}{p^2 + b_1 p + b_0}.$$

Для того чтобы воспользоваться системой SCADA Suite, модель объекта должна быть преобразована в дискретный вид, для чего воспользуемся z-преобразованием (подстановкой):

$$P = 2f_D \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}},$$

где f_D – частота дискретизации.

$$4f_D^2 \cdot \frac{(1 - z^{-1})^2}{(1 + z^{-1})^2} + b_1 \cdot 2f_D \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} + b_0 = \frac{X(z)}{Y(z)}.$$

После несложных преобразований получим выражение (1), которое может быть смоделировано в системе SCADA Suite:

$$(4f_D^2 + b_1 2f_D + b_0) \cdot Y(z) = X(z) + 2X(z)z^{-1} + X(z)z^{-2} + (-8f_D^2 + 2b_0) \cdot Y(z)z^{-1} + (4f_D^2 + b_1 2f_D + b_0) \cdot z^{-2} Y(z).$$

В соответствии с этим выражением составлена структура объекта второго порядка (рис. 4).

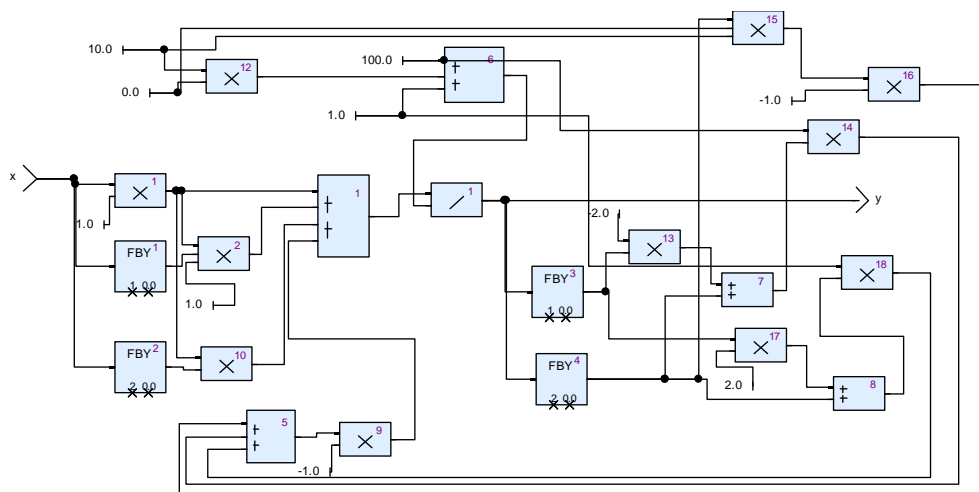


Рис. 4. Структура объекта второго порядка

По указанному выше алгоритму можно описать любые объекты.

Для исследования системы нейронечеткого управления собрана система (рис. 5). На этой модели можно исследовать системы управления с обратной связью по ошибке, по первой и второй производным для разных методов адаптации и разных активационных функций.

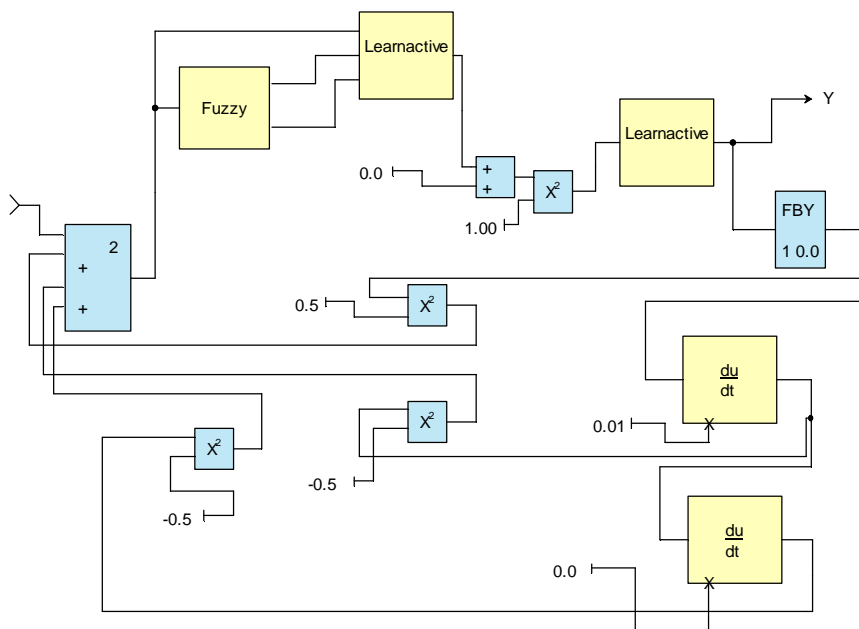


Рис. 5. Схема с обратной связью по ошибке, по первой и второй производным, сигналы с которых поступают на один входной сумматор

На рис. 6, 7 приведены результаты моделирования. В качестве объекта взят объект третьего порядка (по оси абсцисс откладывается машинное время $t_{\text{маш}} = k \frac{1}{f_D}$, а по оси ординат – выходной сигнал с объекта в относительных единицах $Y(\text{относ.})$). Как видно из осциллограммы, объект находится на границе устойчивости.

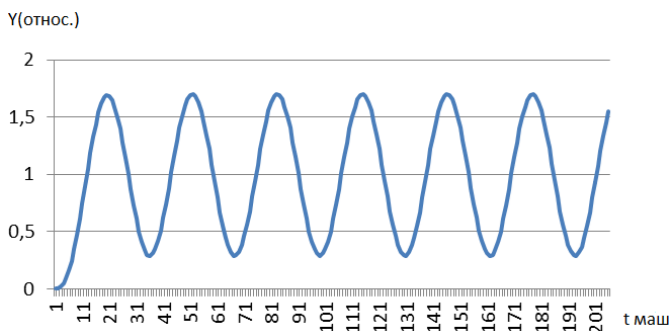


Рис. 6. Выходной сигнал объекта 3-го порядка без управления

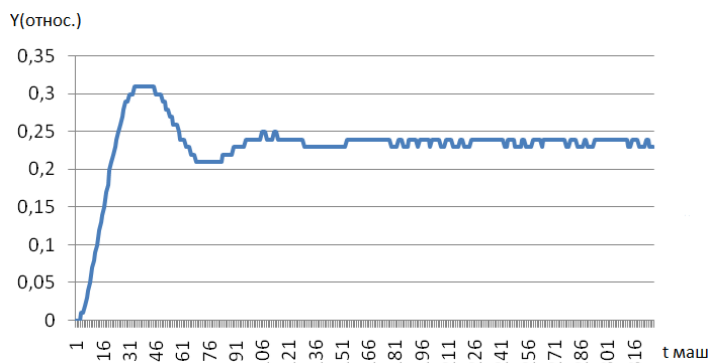


Рис. 7. Включена обратная связь по ошибке, первой и второй производным

При подключении сигнала по первой и второй производным (см. рис. 7) система стала устойчивой, время регулирования значительно уменьшилось, кроме того, уменьшилось и перерегулирование.

Заключение. Структурная схема (см. рис. 5) позволяет провести полное исследование нейронечетких систем управления для любых объектов, используя различные сигналы обратных связей (обратная связь по ошибке, по первой и второй производным – от ошибки),

различные способы подключения, а активационные блоки строить в соответствии с различными активационными функциями. Это могут быть функции вида:

- 1) $f(x) = \frac{1}{1 + e^{-kx}}$ смещенная сигмоидальная функция;
- 2) $f(x) = \frac{1 - e^{-kx}}{1 + e^{-kx}}$ симметричная сигмоидальная функция;
- 3) $\operatorname{tg}kx = \frac{e^{kx} - e^{-kx}}{e^{kx} + e^{-kx}}$ гиперболический тангенс;
- 4) $f(kx) = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg}kx$ обратный гиперболический тангенс;

Такие возможности предоставляет используемая система моделирования SCAD Suite.

Библиографический список

1. Деменков Н.П. Нечеткое управление в технических системах: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 200 с.
2. Денисов И.В., Мещеряков В.А., Итяксова В.С. Моделирование системы нечеткого управления рабочим процессом стрелкового крана // Омский научный вестник. – 2009. – № 3(83). – С. 123–126.
3. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLab. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
4. Агамалов О.Н. Моделирование переходных процессов системы возбуждения турбогенераторов АЭС средствами нейронечеткой идентификации // Exponenta Pro. – 2003. – № 4. – С. 9–14.
5. Scade Language Reference Vfinal. Revision: SC-LRM-SC/U1-63.
6. Хрестоматия [Электронный ресурс]. – URL: <http://zdo.vstu.edu.ru/umk/html/manual/book.html> (дата обращения: 11.05.2012).
7. Омату Сигеру, Халид Марзуки, Юсоф Рубия. Нейроуправление и его приложения = Neuro-Control and its Application. – 2-е изд. – М.: ИПРЖР, 2000. – 272 с.
8. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 284 с.
9. Гроп Д. Методы идентификации систем. – М.: Мир, 1976. – С. 5–9.
10. 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]. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N.E. Baumana, 2005. 200 p.
2. Denisov I.V., Meshcheriakov V.A., Itiaksova V.S. Modelirovanie sistemy nechetkogo upravleniia rabochim protsessom strelkovogo krana [Fuzzy system modeling workflow management of small crane]. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2009, no. 3(83), pp. 123-126.
3. Shtovba S.D. Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MatLab [Design of fuzzy systems by means of MatLab]. Moscow: Goriachaia liniia – Telekom, 2007. 288 p.
4. Agamalov O.N. Modelirovanie perekhodnykh protsessov sistemy vozbuzhdeniia turbogeneratorov AES sredstvami neironechetkoi identifikatsii [Simulation of transient system of turbo-generators of NPP means of neuro-fuzzy identification]. *Exponenta Pro*, 2003, no. 4, pp. 9-14.
5. Scade Language Reference Vfnual. Revision: SC-LRM-SC/U1-63.
6. Khrestomatiia [Chrestomathy], available at: <http://zdo.vstu.edu.ru/umk/html/manual/book.html> (accessed 11 May 2012).
7. Omatu Sigeru, Khalid Marzuki, Iusof Rubiia. Neiroupravlenie i ego prilozheniia [Neurocontrol and its applications]. Moscow: IPRZhR, 2000. 272 p.
8. Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S. Nechetkie modeli i seti [Fuzzy models and networks]. Moscow: Goriachaia liniia – Telekom, 2007. 284 p.
9. Grop D. Metody identifikatsii system [Methods of identification systems]. Moscow: Mir, 1976. pp. 5-9.
10. Legotkina T.S., Danilova S.A. Metody identifikatsii system [Methods of identification systems]. Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2008, pp. 48-50.

Сведения об авторах

Леготкина Татьяна Сергеевна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматике и телемеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: nedonosh@mail.ru).

Луговской Антон Сергеевич (Пермь, Россия) – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29).

Никулин Вячеслав Сергеевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kalif23@yandex.ru).

About the authors

Legotkina Tatyana Sergeevna (Perm, Russian Federation) is Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Automation and Telemechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: nedonosh@mail.ru).

Lugovskoy Anton Sergeevich (Perm, Russian Federation) is a undergraduate student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr.).

Nikulin Vyacheslav Sergeevich (Perm, Russian Federation) is a student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kalif23@yandex.ru).

Получено 15.04.2015