



ISSN 2181-953X

**ТЕМИР ЙЎЛ ТРАНСПОРТИ:  
ДОЛЗАРБ МАСАЛАЛАР  
ВА ИННОВАЦИЯЛАР**

**RAILWAY TRANSPORT:  
TOPICAL ISSUES  
AND INNOVATIONS**

**ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ  
ТРАНСПОРТ:  
АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ИННОВАЦИИ**



# **Железнодорожный транспорт: актуальные задачи и инновации**

**Издается с 2019 года**

---

## **Редакционный совет:**

Хосилов Х.Н., доц. Расулов М.Х., проф. Адилходжаев А.И., проф. Блажко Л.С.,  
проф. Бочков К.А., академик Юсупбеков Н.Р.

## **Редакционная коллегия:**

Главный редактор – проф. Адилходжаев А.И.  
Заместитель главного редактора – проф. Амиров С.Ф.  
Ученый секретарь – доц. Каримова Ф.Ф.

## **Члены редакционной коллегии:**

Академик Аллаев К.Р., проф. Акимаса Фудживара (Япония), проф. Ишанходжаев А.А.,  
проф. Кондращенко В.И. (Россия), проф. Куанышев Б.М. (Казахстан), проф.  
Мансуров Ю.Н., проф. Мирахмедов М.М., проф. Никитин А.Б. (Россия), проф.  
Петрова Т.М. (Россия), проф. Рахмангулов А.Н. (Россия), проф. Сладковский А.В.  
(Польша), проф. Титова Т.С. (Россия).

## **ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

Учредитель научно-технического журнала «Железнодорожный транспорт: актуальные задачи и инновации» – Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (100167, Республика Узбекистан, г. Ташкент, ул. Адилходжаева, дом №1, ком.: 333, тел.+998712990026; e-mail: nauka@tashiit.uz).

В журнале «Железнодорожный транспорт: актуальные задачи и инновации» публикуются наиболее значимые результаты научных и прикладных исследований, выполненных в ВУЗах железнодорожного профиля, других высших учебных заведениях, научно – исследовательских институтах и центрах Республики Узбекистан и зарубежных стран.

Журнал издается 4 раза в год и содержит публикации материалов по следующим основным направлениям:

- Путь и путевое хозяйство;
- Подвижной состав и тяга поездов;
- Электроснабжение, электроподвижной состав, автоматика и телемеханика;
- Организация перевозочного процесса и транспортная логистика;
- Техносферная безопасность;
- Инженерные сооружения и материалы;
- Информационные технологии и информационная безопасность;
- Бизнес и управление.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации № 0952 выдан Агентством по печати и информации Республики Узбекистан.

**Учредитель** - Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта  
100165, Республика Узбекистан, г.Ташкент, ул.Адилходжаева д.1.  
Тел.: +998 71 299 00 26 E-mail: [nauka@tashiit.uz](mailto:nauka@tashiit.uz)

# Railway transport: Actual Tasks and innovations

Published since 2019

---

## Editorial Council:

Hosilov Kh.N., Assoc. Rasulov M.Kh., prof. Adilkhodjaev A.I., prof. Blazhko LS,  
prof. Bochkov K.A., Academician N.R. Yusupbekov

## Editorial team:

Chief Editor - prof. Adilkhodjaev A.I.  
Deputy chief editor - prof. Amirov S.F.  
Scientific Secretary - Assoc. Karimov F.F.

## Members of the editorial team:

Academician Allaev K.R., prof. Akimas Fujiwara (Japan), prof. Ishanhodjaev A.A., prof.  
Kondrashenko V.I. (Russia), prof. Kuanyshhev B.M. (Kazakhstan), prof.  
Mansurov Yu.N., prof. Mirahmedov M.M., prof. Nikitin A.B. (Russia), prof.  
Petrova T.M. (Russia), prof. Rakhmangulov A.N. (Russia), prof. Sladkovsky A.V. (Poland),  
prof. Titova T.S. (Russia).

## TASHKENT INSTITUTE OF RAILWAY TRANSPORT ENGINEERS

The founder of the scientific and technical journal "Railway Transport: Actual Tasks and Innovations" - Tashkent Institute of Railway Engineers (100167, the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Adilkhodzhaev str., Building 1, room .: 333, tel. + 998712990026; e- mail: [nauka@tashiit.uz](mailto:nauka@tashiit.uz)).

In the journal "Railway transport: Actual tasks and innovation" are published the most significant results of scientific and applied research carried out in universities of railway profile, other institutions of higher education, scientific - research institutes and centers of the Republic of Uzbekistan and foreign countries.

The journal is published 4 times a year and contains publications of materials in the following main areas:

- Path and track facilities;
- Rolling stock and traction of trains;
- Power supply, electric rolling stock, automation and telemechanics;
- Organization of transportation process and transport logistics;
- Technosphere safety;
- Engineering structures and materials;
- Information technologies and information security;
- Business and management.

Mass Media Registration Certificate No. 0952 issued by the Press and Information Agency of the Republic of Uzbekistan.

**Founder** - Tashkent Institute of Railway Transport Engineers

100165, the Republic of Uzbekistan, the city of Tashkent, Adilkhodzhaev St., 1.

Tel .: +998 71 299 00 26 E-mail: [nauka@tashiit.uz](mailto:nauka@tashiit.uz)

## СОДЕРЖАНИЕ

### ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА ПОЕЗДОВ

<b>Рахимов Р.В., Рузметов Я.О.</b> Оценка воздействия подвижного состава с увеличенными осевыми нагрузками на путь и установление условий их обращения на железных дорогах Республики Узбекистан.....	5
<b>Хромова Г., Раджибаев Д., Хромов С.</b> Математическая модель колебаний рамной конструкции тележек локомотивов сложной конфигурации при повышенных скоростях движения для транспортного машиностроения.....	14

### ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА И ТРАНСПОРТНАЯ ЛОГИСТИКА

<b>Потылкин Е.Н.</b> Выбор режимов взаимодействия железнодорожного транспорта общего и необщего пользования.....	28
<b>Кобулов Ж.Р., Баратов Ж.С.</b> Совершенствование технологии обслуживания клиентов на железнодорожном транспорте.....	41
<b>Илесалиев Д.И.</b> Методика определения запасов зерна и ёмкости линейного элеватора.....	47

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<b>Сиддиков И.Х., Умурзакова Д.М.</b> Синтез адаптивной нейро-нечеткой системы управления нелинейных динамических объектов.....	54
---	----

### ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<b>Халилова Р.Х.</b> Экологическая безопасность дорожно-транспортной системы.....	74
---	----

## CONTENTS

### ROLLING STOCK AND TRACTION OF TRAINS

<b>Rahimov R.V., Ruzmetov Ya.O.</b> Assessment of the impact of the rolling stock with increased axial loads on a way and setting the conditions of their circulation on the railways of the Republic of Uzbekistan.....	5
<b>Khromova G., Radjibaev D., Khromov S.</b> Mathematical model of vibrations of a locomotive bogie frame structure of complex configuration at increase edmotion speed in transport engineering.....	14

### ORGANIZATION OF TRANSPORTATION PROCESS AND TRANSPORT LOGISTICS

<b>Potylkin Y.N.</b> The choice of modes of interaction of public and non-public rail transport.....	28
<b>Qobulov J.R., Barotov J.S.</b> Improvement of customer service technology in railway transport.....	41
<b>Ilesaliev D.I.</b> Methodology for determination of grain reserves and capacities of a linear elevator.....	47

### INFORMATION TECHNOLOGIES AND INFORMATION SECURITY

<b>Siddikov I.X., Umurzakova D.M.</b> Synthesis of adaptive neuro-fuzzy control system of nonlinear dynamic objects.....	54
--	----

### TECHNOSPHERE SAFETY

<b>Khalilova R.Kh.</b> Ecological safety of the road transport systems .....	74
--	----

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

## SYNTHESIS OF ADAPTIVE NEURO-FUZZY CONTROL SYSTEM OF NONLINEAR DYNAMIC OBJECTS

**Siddikov I.X.**

**Umurzakova D.M.**

Tashkent State technical university, Tashkent, Uzbekistan

- Abstract:** Development of an adaptive neuro-fuzzy control system for nonlinear dynamic objects. Based on the hybrid use of neural networks and fuzzy logic. An application of an adaptive identifier for a neuro-fuzzy control system for a nonlinear dynamic object, functioning in conditions of uncertainty of changes in internal properties and the external environment, is proposed. Algorithms for structural and parametric identification in real time, which is a combination of the algorithm for identifying coefficients of linear equations and the method of the theory of interactive adaptation, have been developed. The structure of the proposed system consists of three parts: the object itself, the controller emulator and the compensator. The developed hybrid model, built on the basis of neural networks and fuzzy models, improves the efficiency of solving the problem of managing complex dynamic objects in conditions of uncertainty. For the formalization of the compensator, the emulator and the regulator, a fuzzy model of Sugeno, the architecture of which consists of five layers, is proposed to be used.
- Key words:** Hybrid model, Sugeno model, emulator, compensator, neuro-fuzzy control system, dynamic object

## СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ НЕЙРО-НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

- Аннотация:** Разработка адаптивной нейро-нечеткой системы управления нелинейными динамическими объектами. На основе гибридного применения нейронной сети и нечеткой логики. Предложено применение адаптивного идентификатора для нейро-нечеткой системы управления нелинейным динамическим объектом, функционирующего в условиях неопределенности изменения внутренних свойств и внешней среды. Разработаны алгоритмы структурной и параметрической идентификации в реальном времени, представляющей собой комбинацию алгоритма идентификации коэффициентов линейных уравнений и метода теории интерактивной адаптации. Структура предложенной системы состоит из трех частей: самого объекта, эмулятора регулятора и компенсатора. Разработанная гибридная модель, построенная на основе нейронных сетей и нечетких моделей, позволяет повысить эффективность решение задачи управления сложными динамическими объектами в условиях неопределенности. Для формализации компенсатора, эмулятора и регулятора предложен применения нечеткая модель Сугено, архитектура которой состоящий из пяти слоев, обучения нечеткой сети осуществляется методом интерактивной адаптации.



**Ключевые слова:** Гибридная модель, модель Сугено, эмулятор, компенсатор, нейро-нечеткая система управления, динамическая объект.

**Введение.** Большинство динамических объектов функционирует в условиях неопределенности, которые характеризуются сложными и плохо изученными связями между технологическими переменными, наличием возмущающих и случайных помех, а также нелинейных элементов, которые затрудняют применение линейных алгоритмов адаптивного управления динамическими объектами. Рассмотрим задачу управления динамическим объектом на основе гибридного применения нейронной сети и нечеткой логики. В таких системах объект управления и регулятор описываются нечеткими адаптивными моделями, структура которой формируется на основании анализа технологических переменных и характера связей между ними с возможностью настройки на меняющиеся условия функционирования объекта.

**Результаты.** Пусть динамика объекта управления может быть представлена в виде нелинейного разностного уравнения:

$$y(i+1) = f(y(i), \dots, y(i-r), \bar{x}(i), \dots, \bar{x}(i-s), u(i), \dots, u(i-q)), \quad (1)$$

где  $i = 0, 1, 2, \dots, N$  - текущее дискретное время;  $y(i)$  - выходной сигнал,  $\bar{x}(i) = (\bar{x}_1(i), \dots, \bar{x}_k(i))$  - вектор возмущающих воздействий;  $u(i)$  - управление;  $f(y(i), \dots, y(i-r), \bar{x}(i), \dots, \bar{x}(i-s), u(i), \dots, u(i-q))$  - некоторая нелинейная функция, имеющая известные порядки  $r, s, q$ .

Входные координаты объекта ограничены в любой момент времени, т.е.

$$\begin{aligned} u^{\min} \leq u(i) \leq u^{\max}, \\ \bar{x}^{\min} \leq \bar{x}(i) \leq \bar{x}^{\max}, i = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (2)$$

Требуется построить алгоритм управления объектом (1), который обеспечивает допустимую ошибку регулирования  $e(i+1) = y^H - y(i+1)$  при выполнении ограничений (2), где  $y^H$  - номинальное значение выхода. Для этих целей предлагается использовать нейро-нечёткую адаптивную систему

управления (рис. 1), в которой влияния возмущающих воздействий в значительной степени устраняются компенсатором, а ошибка регулирования  $e(i+1)$  - регулятором. Эмулятор представляет собой модель объекта, предназначенную для настройки регулятора. Компенсатор возмущений, регулятор и эмулятор строятся на основе нечеткой модели Сугено, упрощенная структура которой изображена на рис. 1.

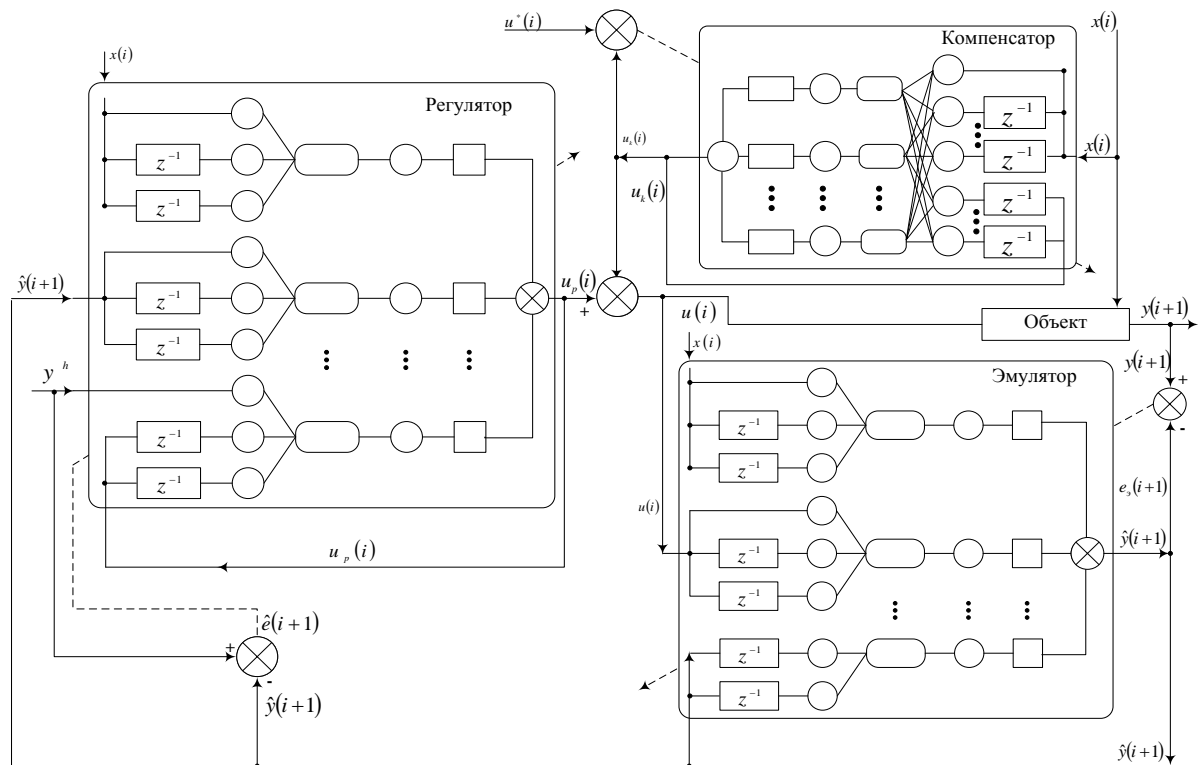


Рис. 1. Упрощенная структура нейро-нечеткой адаптивной системы управления.

Регулятор, компенсатор и эмулятор содержат элементы запаздывания  $z^{-\tau}$ ,  $\tau = 1, 2, \dots$ , формирующие значения входных и выходных переменных с задержкой. Так же, как объект, компенсатор описывается нелинейным разностным уравнением:

$$u_k(i) = f_k(u_k(i-1), \dots, u_k(i-q_k), \bar{x}(i), x(i-1), \dots, x(i-s_k), \bar{c}_k), \quad (3)$$

имеющим порядки  $q_k$  и  $s_k$ , отличающиеся в общем случае от  $q$  и  $s$ . Здесь  $u_k(i-1), \dots, u_k(i-q_k)$  - скалярные управляющие воздействия,  $\bar{x}(i)$  - вектор входных возмущений размерностью  $v$  и  $\bar{c}_k$  - вектор параметров настройки.

Для удобства изложения объединим переменные  $u_k(i-1), \dots, u_k(i-q_k), \bar{x}(i), \dots, x(i-s_k)$ , т.е. заменим их входным вектором  $x_k(i) = (x_{k1}(i), \dots, x_{km}(i))$ , имеющим размерность  $m = q_k + v(s_k + 1)$ . Тогда (3) можно переписать так

$$u_k(i) = f_k(\bar{x}_k(i), \bar{c}_k). \quad (4)$$

В качестве разностного уравнения (4) для описания компенсатора используется нечеткая модель Сугено, представленная совокупностью правил

$$\begin{aligned} &\text{если } x_{k1}(i) \text{ есть } X_{k1}^\theta \\ &x_{k2}(i) \text{ есть } X_{k2}^\theta, \dots, x_{km}(i) \text{ есть } X_{km}^\theta, \\ &\text{то } u_k^\theta(i) = b_{k0}^\theta + b_{k1}^\theta x_{k1}(i) + \dots + b_{km}^\theta x_{km}(i), \\ &\theta = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (5)$$

с нечеткими множествами  $X_{kl}^\theta, l = \overline{1, m}$  и линейной зависимостью, связывающей входы  $\bar{x}_k(i) = (x_{k1}(i), x_{k2}(i), \dots, x_{km}(i))$  и выход  $u_k^\theta(i)$ .

Основной характеристикой, задающей нечеткое множество  $X_k$  является функция принадлежности  $X_k(x_k)$ , которая имеет вид сигмоиды

$$X_k(x_k) = (1 + \exp(d_{k1}(x_k + d_{k2})))^{-1}. \quad (6)$$

Механизм определения выхода  $u_k(i)$  по нечеткой модели (6) при задании входов  $x_{kl}^0(i)$  в момент времени  $i = 1, 2, \dots, N$ , функций принадлежности  $X_{kl}^0(x_{kl}(i))$  и коэффициентов  $b_{k0}^\theta, b_{k1}^\theta, \dots, b_{km}^\theta, \theta = \overline{1, n}, l = \overline{1, m}$ , линейных уравнений

$$\begin{aligned} u_k^\theta(i) &= b_{k0}^\theta + b_{k1}^\theta x_{k1}(i) + \dots + b_{km}^\theta x_{km}(i), \\ \theta &= \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (7)$$

можно представить в виде нечеткой пятислойной нейронной сети.

В первом слое вычисляются степени принадлежности  $X_{kl}^\theta(x_{kl}^0(i)), \dots, X_{km}^\theta(x_{km}^0(i))$  для того  $\theta$ -го правила, а во втором слое значения истинности посылок  $w_k^\theta$  путем алгебраического умножения



$$w_k^\theta = X_{k1}^\theta(x_{k1}(i))X_{k2}^\theta(x_{k2}(i))..X_{km}^\theta(x_{km}(i)). \quad (8)$$

В третьем слое определяются относительные нормализованные значения истинности посылок

$$\beta_k^\theta(i) = \frac{w_k^\theta(i)}{w_k^1(i) + w_k^2(i) + \dots + w_k^n(i)}. \quad (9)$$

В четвертом слое значения  $\beta_k^\theta(i)$  умножаются на значения выхода  $u_k^0(i)$ , рассчитанные по линейным уравнениям (7) при постановке значений  $x_{k1}^0(i), x_{k2}^0(i), \dots, x_{km}^0(i)$ .

В последнем пятом слое итоговое значение  $u_k(i)$  по всем правилам находится как средневзвешенная сумма  $u_k^0(i)$

$$u_k(i) = \sum_{\theta=1}^n \beta_k^\theta(i) u_k^0(i). \quad (10)$$

В нечеткой модели компенсатора вектор параметров настройки  $\overline{c_k}$  составляют коэффициенты  $b_{kl}^\theta, l = \overline{0, m}$ , линейных уравнений (7) и параметры  $d_{k1,l}^\theta, d_{k2,l}^\theta, l = \overline{1, m}, \theta = \overline{1, n}$ , функций принадлежности.

В начале настройка модели компенсатора осуществляется по имеющимся данным и заключается в определении количества нечетких правил  $n$  алгоритмом структурной идентификации  $\psi_n$ , коэффициентов линейных уравнений  $b_{kl}^\theta, \theta = \overline{1, n}, l = \overline{0, m}$  алгоритмом параметрической идентификации  $\psi_b$  и, если необходимо, параметры функций принадлежности  $d_{k1,l}^\theta, d_{k2,l}^\theta, l = \overline{1, m}$ , методом обратного распространения ошибки  $\psi_{BP}$ .

В этом случае используются данные  $x_{k1}^*(i), \dots, x_{km}^*(i), u^*(i)$ , при которых выходная переменная  $y(i+1)$  близка к номинальному значению  $y^H$ , т.е. удовлетворяет условию

$$J^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y^H - y(x_k^*(i), u^*(i))| / y^H \leq J^H, \quad (11)$$

где  $J^H$  - номинальное значение относительной ошибки регулирования.

Начнем с алгоритма идентификации коэффициентов линейных уравнений  $b_{kl}^\theta, \theta = \overline{1, n}, l = \overline{0, m}$ , выполняемой на множестве данных  $x_{k1}^*(i), \dots, x_{km}^*(i), u^*(i), i = \overline{1, N}$ . На основании (7)-(9) запишем (10) сначала в развернутом виде

$$u_k(i) = b_{k0}^1 \beta_k^1(i) + \dots + b_{k0}^n \beta_k^n(i) + b_{k1}^1 x_{k1}^*(i) \beta_k^1(i) + \dots + b_{k1}^n x_{k1}^*(i) \beta_k^n(i) + \dots + b_k^1 x_{km}^*(i) \beta_k^1(i) + \dots + b_{km}^n x_{km}^*(i) \beta_k^n(i),$$

затем в векторной форме

$$u_k(i) = \overline{b_k^T} \tilde{x}_k(i), \quad (12)$$

где  $\overline{b_k} = [b_{k0}^1, \dots, b_{k0}^n, b_{k1}^1, \dots, b_{k1}^n, \dots, b_{km}^1, \dots, b_{km}^n]^T$  - вектор настраиваемых коэффициентов,

$$\tilde{x}_k(i) = [\beta_k^1(i), \dots, \beta_k^n(i), x_{k1}^*(i) \beta_k^1(i), \dots, x_{k1}^*(i) \beta_k^n(i), \dots, x_{km}^*(i) \beta_k^1(i), \dots, x_{km}^*(i) \beta_k^n(i)]^T$$

- расширенный входной вектор; Т-знак транспонирования.

Вектор параметров модели

$\overline{b_k}(i) = [b_{k0}^1(i), \dots, b_{k0}^n(i), b_{k1}^1(i), \dots, b_{k1}^n(i), \dots, b_{km}^1(i), \dots, b_{km}^n(i)]^T$  для  $i$ -го набора данных

$x_k^*(i), u^*(i)$  определяется следующим образом. Задаются начальные значения элементов вектора  $\overline{b_k}(0) = 0$  и корректирующей матрицы размером  $n(m+1) \times n(m+1)$

$$H_k(0) = \begin{bmatrix} \alpha_k & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_k & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \alpha_k \end{bmatrix},$$

где  $\alpha_k$  - достаточно большое число, которое выбирается опытным путем.

Для набора данных  $x_k^*(i), u^*(i), i = 1, 2, \dots, N$  вычисляется корректирующая матрица

$$H_k(i) = H_k(i-1) - \frac{H_k(i-1) \tilde{x}_k(i) \tilde{x}_k^T(i) H_k(i-1)}{1 + \tilde{x}_k^T(i) H_k(i-1) \tilde{x}_k(i)} \quad (13)$$

и вектор коэффициентов

$$\overline{b}_k(i) = \overline{b}_k(i-1) + H_k(i) \tilde{x}_k(i) (u^*(i) - \overline{b}_k^T(i-1) \tilde{x}_k(i)). \quad (14)$$

Искомое значение вектора  $\overline{b}_k$  равно  $\overline{b}_k(N)$ .

Работа алгоритма структурной идентификации  $\Psi_n$  начинается с выбора нечеткой модели с минимальным значением критерия

$$J_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \left( u^*(i) - u_k(\overline{x}_k^*(i)) \right) / u^*(i) \right| \quad (15)$$

из некоторого числа предъявленных моделей. При наличии лишь одной модели, например на первой итерации, эта процедура не выполняется.

Полученная нечеткая модель в дальнейшем обучается по текущим данным путем направленного изменения коэффициентов  $b_l^\theta, \theta = \overline{1, n}, l = \overline{0, m}$ , многошаговым методом наименьших квадратов (13), (14) и параметров функций принадлежности  $d_{k1,l}^\theta, d_{k2,l}^\theta$  методом обратного распространения ошибки. Последний заключается в минимизации квадратической ошибки

$$E_k(i) = 0.5 e_k^2(i) = 0.5 \left( u^*(i) - u_k(\overline{d}_k, \overline{x}_k^*(i)) \right)^2 \quad (16)$$

градиентным методом по формуле

$$d_k(\lambda + 1) = d_k(\lambda) - \Delta d_k(\lambda) \quad (17)$$

с рабочим шагом  $\Delta \overline{d}_k = h_k (\partial E_k / \partial \overline{d}_k)$ , где  $h_k$  параметр рабочего шага.

Запишем цепное правило определения частной производной

$$\frac{\partial E_k}{\partial d_{kl}^\theta} = \frac{\partial E_k}{\partial u_k} \frac{\partial u_k}{\partial w_k^\theta} \frac{\partial w_k^\theta}{\partial x_{kl}^\theta} \frac{\partial x_{kl}^\theta}{\partial d_{kl}^\theta}, \quad (18)$$

где  $\overline{d}_{kl}^\theta = (d_{k1,l}^\theta, d_{k2,l}^\theta)$  - двухэлементный вектор параметров сигмоиды.

Определим каждую компоненту частной производной (18), используя соотношения (6)-(10).

Первая компонента получается из (16)

$$\frac{\partial E_k}{\partial u_k} = (u^* - u_k);$$

вторая – из (7) и (9)

$$\frac{\partial u_k}{\partial w_k^\theta} = \frac{u_k^\theta \sum_{j=1}^n w_k^j - w_k^\theta \sum_{j=1}^n w_k^j u_k^j}{\left( \sum_{j=1}^n w_k^j \right)} = \frac{u_k^\theta - w_k^\theta u_k}{\sum_{j=1}^n w_k^j};$$

третья из (8)

$$\frac{\partial w_k^\theta}{\partial X_{kl}^\theta(x_l)} = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq l}}^m X_{kj}^\theta(x_{kj}^*), \quad l = \overline{1, m};$$

Четвертая - производная от сигмоиды по  $d_{k1,l}^\theta$ ,

$$\frac{\partial X_{kl}^\theta}{\partial d_{k1,l}^\theta} = X_{kl}^\theta(x_{kl}^*)(1 - X_{kl}^\theta(x_{kl}^*))(x_{kl}^* + d_{k2,l}^\theta)$$

или по  $d_{k2,l}^\theta$

$$\frac{\partial X_{kl}^\theta}{\partial d_{k2,l}^\theta} = X_{kl}^\theta(x_{kl}^*)(1 - X_{kl}^\theta(x_{kl}^*))d_{k1,l}^\theta, \\ l = \overline{1, m}, \quad \theta = \overline{1, n}.$$

Теперь запишем аналитическое выражение частных производных по параметру  $d_{k1,l}^\theta$

$$\frac{\partial E_k}{\partial d_{k1,l}^\theta} = (u_k^* - u_k) \frac{(u_k^\theta - w_k^\theta u_k)}{\left( \sum_{j=1}^n w_k^j \right)^2} \times \left( \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq l}}^m X_{kj}^\theta(x_{kj}^*) \right) X_{kl}^\theta(x_{kl}^*)(1 - X_{kl}^\theta(x_{kl}^*))(x_{kl}^* + d_{k2,l}^\theta) \quad (19)$$

и по параметру  $d_{k2,l}^\theta$

$$\frac{\partial E_k}{\partial d_{k2,l}^\theta} = (u_k^* - u_k) \frac{(u_k^\theta - w_k^\theta u_k)}{\left( \sum_{j=1}^n w_k^j \right)^2} \times \left( \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq l}}^m X_{kj}^\theta(x_{kj}^*) \right) X_{kl}^\theta(x_{kl}^*)(1 - X_{kl}^\theta(x_{kl}^*))d_{k1,l}^\theta, \\ \theta = \overline{1, n}, \quad l = \overline{1, m}. \quad (20)$$

Эмулятор – это упрощенная динамическая модель объекта, которая описывается уравнением.

$$\hat{y}(i+1) = f_y(u(i), \dots, u(i-q), \\ \bar{x}(i), \dots, \bar{x}(i-s), y(i), \dots, y(i-r), \bar{c}_y), \quad (21)$$

имеющая те же порядки  $q, s, r$ , что и (1), которую после формализации

переменных

$$\overline{x}_s(i) = (x_{s1}(i), \dots, x_{sm}(i)) = (u(i), \dots, x(i), \dots, y(i-r))$$

также представим в виде нечеткой модели Сугено

$$\begin{aligned} R_s^\theta; \text{ если } x_{s1}(i) \text{ есть } X_{s1}^\theta \\ x_{s2}(i) \text{ есть } X_{s2}^\theta, \dots, x_{sm}(i) \text{ есть } X_{sm}^\theta, \\ \text{то } y^\theta(i+1) = b_{s0}^\theta + b_{s1}^\theta x_{s1}(i) + \dots + b_{sm}^\theta x_{sm}(i), \\ \theta = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (22)$$

Запишем аналитическое выражение нечеткого эмулятора

$$\hat{y}(i+1) = \sum_{\theta=1}^{n'} \beta_s^\theta y^\theta(i+1), \quad (23)$$

где

$$\begin{aligned} \beta_s^\theta &= w_s^\theta(i) / \left( \sum_{\theta=1}^{n'} w_s^\theta(i) \right); \\ w_s^\theta(i) &= \prod_{l=1}^{m'} X_{sl}^\theta(x_{sl}(i)), \end{aligned}$$

его векторное представление

$$\hat{y}(i+1) = \overline{b}_s^T \tilde{x}_s(i),$$

а также алгоритм идентификации коэффициентов  $\overline{b}_s(i)$

$$H_s(i) = H_s(i-1) - \frac{H_s(i-1) \tilde{x}_s(i) \tilde{x}_s^T(i) H_s(i-1)}{1 + \tilde{x}_s^T(i) H_s(i-1) \tilde{x}_s(i)}, \quad (24)$$

$$\begin{aligned} b_s(i) &= b_s(i-1) + H_s(i) \tilde{x}_s(i) (y(i) - b_s^T(i-1) \tilde{x}_s(i)), \\ i &= \overline{1, N}, \end{aligned} \quad (25)$$

где

$$\tilde{x}_s(i) = (\beta_s^1(i), \dots, \beta_s^{n'}(i), \beta_s^1(i)x_{s1}(i), \dots, \beta_s^1(i)x_{sm'}(i), \dots, \beta_s^{n'}(i)x_{sm'}(i))^T -$$

модифицированный

входной

вектор;

$\overline{b}_s = (b_{s0}^1(i), \dots, b_{s0}^{n'}(i), b_{s1}^1(i), \dots, b_{s1}^{n'}(i), \dots, b_{sm'}^1(i), \dots, b_{sm'}^{n'}(i))^T$  - вектор настраиваемых параметров.

При структурной идентификации используются общие критерии, характеризующие средние относительные ошибки:

$$J_s = \frac{1}{N+1} \sum_{i=0}^N (|y(i+1) - \hat{y}(i+1)| / y(i+1)).$$

Параметры функций принадлежности эмулятора  
 $\overline{d}_\theta = (d_{\theta 1,l}^\theta, d_{\theta 2,l}^\theta), l = 1, m', \theta = \overline{1, n'}$ , определяются методом обратного  
 распространения ошибки путем минимизации квадратической невязки

$$E_\theta(i+1) = 0.5e_\theta^2(i+1) = 0.5(y(i+1) - \hat{y}(\overline{d}_\theta, \overline{x}_\theta(i)))^2$$

градиентным спуском

$$d_\theta(\lambda+1) = d_\theta(\lambda) - h_\theta \left( \frac{\partial E_\theta}{\partial d_\theta} \right),$$

где  $h_\theta$  - параметр рабочего шага. Приведем аналитические выражения  
 частных производных по параметру  $d_{\theta 1,l}^\theta$

$$\frac{\partial E_\theta}{\partial d_{\theta 1,l}^\theta} = (y - \hat{y}) \frac{(y - w_\theta^\theta \hat{y})}{\left( \sum_{j=1}^{n'} w_\theta^j \right)^2} \times \left( \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq l}}^{m'} X_{\theta j}^\theta(x_{\theta j}) \right) (x_{\theta l} + d_{\theta 2,l}^\theta)$$

и по параметру  $d_{\theta 2,l}^\theta$

$$\frac{\partial E_\theta}{\partial d_{\theta 2,l}^\theta} = (y - \hat{y}) \frac{(y - w_\theta^\theta \hat{y})}{\left( \sum_{j=1}^{n'} w_\theta^j \right)^2} \times \left( \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq l}}^{m'} X_{\theta j}^\theta(x_{\theta j}) \right) (1 - X_{\theta l}^\theta(x_{\theta l})) d_{\theta 1,l}^\theta,$$

$$l = \overline{1, m'}, \quad \theta = \overline{1, n'}.$$

Параметрическая и структурная идентификации прекращаются при  
 выполнении условия

$$J_\theta = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (|y(i+1) - \hat{y}(i+1)| / y(i+1)) \leq J_\theta^H,$$

где  $J_\theta$  - средняя относительная ошибка эмулятора с допустимым  
 значением  $J_\theta^H$ .

Предположим, что объект управления, описываемый уравнением (1),  
 является обратимым, т.е. существует функция  $f_p(\bullet)$ , именуемая моделью  
 регулятора, такая, что

$$\begin{aligned}
 u_p(i) &= f_p(u_p(i-1), \dots, u_p(i-q), \\
 \overline{x}(i), \dots, \overline{x}(i-s), \hat{y}(i+1), \dots, \hat{y}(i-r), y^H, \overline{c}_p).
 \end{aligned} \tag{26}$$



Переходя к формализованным обозначениям

$$\begin{aligned} x_p(i) &= (x_{p1}(i), x_{p2}(i), \dots, x_{pm''}(i)) = \\ &= u_p(i-1), \dots, u_p(i-q), \bar{x}(i), \dots, \bar{x}(i-s), \hat{y}(i+1), \dots, \hat{y}(i-r), y^u). \end{aligned}$$

запишем (26) в виде нечеткой модели Сугено

$$\begin{aligned} \text{если } x_{p1}(i) \text{ есть } X_{p1}^\theta, \dots, x_{pm''}(i) \text{ есть } X_{pm''}^\theta, \\ \text{то } u_p(i) &= b_{p0}^\theta + b_{p1}^\theta x_{p1}(i) + \dots + b_{pm''}^\theta x_{pm''}(i), \\ \theta &= \overline{1, n''}, \end{aligned}$$

Используем алгоритмы параметрической и структурной идентификации, а также сигмоидальную функцию принадлежности

$$X_p(x_p) = (1 + \exp(d_{p1}(x_p - d_{p2})))^{-1}.$$

Следовательно, вектор параметров настройки регулятора  $c_p$  будет включать векторы коэффициентов линейных уравнений

$$\bar{b}_p = (b_{p0}^1, \dots, b_{p0}^{n''}, b_{p1}^1, \dots, b_{p1}^{n''}, \dots, b_{pm''}^1, \dots, b_{pm''}^{n''})$$

и параметров функции принадлежности

$$\bar{d}_p = (d_{p1,1}^1, d_{p2,1}^1, \dots, d_{p1,m''}^1, d_{p2,m''}^1, \dots, d_{p1,1}^{n''}, d_{p2,1}^{n''}, \dots, d_{p1,m''}^{n''}, d_{p2,m''}^{n''}).$$

Без вывода приведем аналитическое выражение модели Сугено

$$u_p(i) = \frac{\sum_{\theta=1}^{n''} w_p^\theta(i) u_p^\theta(i)}{\sum_{\theta=1}^{n''} w_p^\theta(i)}$$

и его векторную форму

$$u_p(i) = \bar{b}_p^T \tilde{x}_p(i),$$

где  $\tilde{x}_p^T(i) = [\beta_p^1(i), \dots, \beta_p^{n''}(i), x_{p1}(i)\beta_p^1(i), \dots, x_{p1}\beta_p^{n''}(i), x_{pm''}(i)\beta_p^1(i), \dots, x_{pm''}(i)\beta_p^{n''}(i)]$  -

расширенный входной вектор;  $\beta_p^\theta(i) = w_p^\theta(i) / \left( \sum_{\theta=1}^{n''} w_p^\theta(i) \right)$  - нечеткая функция.

Идентификация структуры и параметров инверсной модели регулятора осуществляется в два этапа. На первом этапе по модели эмулятора одномерным поисковым алгоритмом в точках  $i = \overline{1, N}$  определяются такие управления  $u^*(i) = u_p^*(i) + u_k(i)$  и соответственно регулирующие воздействия

$u_p^*(i)$ , при которых ошибка эмулятора  $e_s(i+1) = y(i+1) - \hat{y}(i+1)$  удовлетворяет ограничениям

$$\delta y_{\min} \leq |l_s(i+1)| \leq \delta y_{\max}, \quad i = \overline{0, N-1}.$$

На втором этапе осуществляется структурная идентификация и идентификация коэффициентов линейных уравнений  $\overline{b_p}$  и параметров функций принадлежности  $\overline{d_p}$ . Вектор коэффициентов  $\overline{b_p}$  вычисляется с помощью рекуррентного метода наименьших квадратов

$$H_p(i) = H_p(i-1) - \frac{H_p(i-1)\tilde{x}_p(i)\tilde{x}_p^T(i)H_p(i-1)}{1 + \tilde{x}_p^T(i)H_p(i-1)\tilde{x}_p(i)},$$

$$\begin{aligned} \overline{b_p}(i) &= \overline{b_p}(i-1) + H_p(i)\tilde{x}_p(i)[u_p^*(i) - \overline{b_p}^T(i-1)\tilde{x}_p(i)], \\ H_p(0) &= \mathcal{I}, \quad \gamma \gg 1, \quad i = \overline{1, N}, \end{aligned}$$

Здесь критерием адекватности является

$$J_p = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (|u_p^*(i) - u_p(i)| / |u_p^*(i)|),$$

Структурная и параметрическая идентификация завершается при выполнении условия

$$J_p \leq J_p^{\text{н}},$$

где  $J_p^{\text{н}}$  - номинальная величина ошибки регулирования.

Определим параметры функций принадлежности регулятора  $d_{p1,l}^{\theta}, d_{p2,l}^{\theta}, \theta = \overline{1, n''}, l = \overline{1, m''}$ , обучая его управлению с минимальной квадратичной ошибкой  $E = 0.5e^2(i+1) = 0.5(y'' - \hat{y}(i+1))^2$  с помощью градиентного метода

$$d_p(\lambda+1) = d_p(\lambda) + \Delta d_p(\lambda),$$

где  $\Delta d_p = (h_p \partial E / \partial d_p)$  - рабочий шаг,  $h_p$  - параметр рабочего шага.

Для последовательно соединенных регулятора и эмулятора частные производные, согласно цепному правилу, будут иметь вид

$$\frac{\partial E}{\partial d_p} = \frac{\partial u_p}{\partial d_p} \frac{\partial \hat{y}}{\partial u_p} \frac{\partial E}{\partial \hat{y}}.$$

По аналогии с (19) и (20) приведем без вывода выражения частных

производных по параметру  $d_{p1,l}^\theta$

$$\frac{\partial u_p}{\partial d_{p1,l}^\theta} = \frac{u_p^\theta - w_p^\theta u_p^\theta}{\sum_{j=1}^{n''} w_p^j} \times \left( \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq l}}^{m''} X_{pj}^\theta(x_{pj}) \right) X_{pl}^\theta(x_{pl})(1 - X_{pl}^\theta(x_{pl}))(x_{pl} + d_{p2,l}^\theta)$$

и по параметру  $d_{p2,l}^\theta$

$$\frac{\partial u_p}{\partial d_{p2,l}^\theta} = \frac{u_p^\theta - w_p^\theta u_p^\theta}{\sum_{j=1}^{n''} w_p^j} \times \left( \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq l}}^{m''} X_{pj}^\theta(x_{pj}) \right) X_{pl}^\theta(x_{pl})(1 - X_{pl}^\theta(x_{pl}))d_{p2,l}^\theta,$$

$$\theta = \overline{1, n''}, l = \overline{1, m''}.$$

Принимая постоянным  $u_k$ , и учитывая, что  $u_p = x_{\text{э}1}$ , т.е.  $du_p = d(u_k + u_p) = dx_{\text{э}1}$  определим аналитическое выражение Якобиана для объекта  $\partial \hat{y}(i+1)/\partial x_{\text{э}1}(i)$ , которое является суммой производных от произведений двух функций  $\beta^\theta$  и  $\hat{y}^\theta$

$$\frac{\partial \hat{y}_i}{\partial x_{\text{э}1}} = \sum_{\theta=1}^{n'} \left( \frac{\partial \beta^\theta}{\partial x_{\text{э}1}} y^\theta + \frac{\partial y^\theta}{\partial x_{\text{э}1}} \beta^\theta \right). \quad (27)$$

В соответствии с цепным правилом запишем полную производную первого слагаемого

$$\frac{\partial \beta_\text{э}^\theta}{\partial x_{\text{э}1}} y^\theta = \frac{\partial \beta_\text{э}^\theta}{\partial w_\text{э}^\theta} \frac{\partial w_\text{э}^\theta}{\partial X_{\text{э}1}^\theta} \frac{\partial X_{\text{э}1}^\theta}{\partial x_{\text{э}1}} y^\theta$$

и определим первую

$$\frac{\partial \beta_\text{э}^\theta}{\partial x_{\text{э}1}} y^\theta = \frac{y^\theta - w_\text{э}^\theta \hat{y}}{\sum_{j=1}^{n'} w_\text{э}^j},$$

вторую

$$\frac{\partial w_\text{э}^\theta}{\partial x_{\text{э}1}} = \prod_{l=2}^{m'} X_{\text{э}l}^\theta(x_{\text{э}l})$$

и третью компоненту

$$\frac{\partial X_{\text{э}1}^\theta(x_{\text{э}1})}{\partial x_{\text{э}1}} = X_{\text{э}1}^\theta(x_{\text{э}1})(1 - X_{\text{э}1}^\theta(x_{\text{э}1}))d_{\text{э}1,1}^\theta,$$

где  $X_{\text{э}1}^\theta(x_{\text{э}1}) = (1 + \exp(d_{\text{э}1}^\theta(x_{\text{э}1} + d_{\text{э}1,2}^\theta)))^{-1}$ .

Второе слагаемое производной (27) имеет вид

$$\frac{\partial y^\theta}{\partial x_{\theta 1}} \beta_\theta^\theta = b_{\theta 1}^\theta \beta_\theta^\theta.$$

Теперь запишем полное выражение производной (27)

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_{\theta 1}} = \sum_{\theta=1}^{n'} \left[ \frac{y^\theta - w_\theta^\theta \hat{y}}{\sum_{j=1}^{n'} w_\theta^j} \times \prod_{l=2}^{m'} X_{\theta l}^\theta(x_{\theta l})(1 - X_{\theta 1}^\theta(x_{\theta 1})) d_{\theta 1}^\theta + b_{\theta 1}^\theta \beta_\theta^\theta \right].$$

Параметры  $\overline{b_p}$  и  $\overline{c_p}$  считаются найденными, если средняя относительная ошибка регулирования

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|y^u - y(i)| / y^u),$$

удовлетворяет условию  $J \leq J^u$ , где  $J^u$  - номинальная величина ошибки регулирования.

Рассмотрим систему управления динамическими объектами с нечетким регулятором, на входные величины которой введена дополнительная корректирующая связь по динамике переходного процесса, характер и параметры которого задаются функциональным преобразователем.

Изменение параметров функционального преобразователя позволяет корректировать как динамические, так и статические характеристики системы управления. Такая структура регулятора в сочетании с оптимальным выбором параметров нечеткого регулятора, позволяет при минимуме настроек реализовывать адаптивные системы управления неопределенными и нестационарными механизмами вне зависимости от их структуры.

Для придания адаптивных свойств нечеткому регулятору, с целью обеспечения устойчивости динамической системы к возмущениям (изменениям параметров объекта управления и внешних воздействий), осуществлена оценка скорости изменения ошибки регулирования  $\Delta \epsilon$ .

Для обучения нечеткого регулятора с функциональным преобразователем предлагается алгоритм, основанный на теории интерактивной адаптации.

Сущность данного алгоритма заключается в том, что ошибка, которая

требуется для обучения, вычисляется неявным образом.

При использовании алгоритма интерактивной адаптации система разбивается на  $N$ -подсистем, каждый из которых имеет интегрируемый выходной сигнал  $y_n$  и интегрируемый входной сигнал  $x_n$ , отношение между ними представляется в виде функциональной зависимости

$$F_n : X_n \rightarrow Y_n, n = 1, 2, \dots, N$$

Отношение  $i$ -го элемента системы имеет вид:

$$y_i(t) = F_i[x_i(t)], i = 1, 2, \dots, N$$

Пусть взаимодействие между элементами и внешним сигналом  $u_i(t)$  линейно и описывается уравнением:

$$x_i(t) = u_i(t) + \sum_{K \in J_i} \alpha_K \cdot y_i(t), i \in N, \quad (28)$$

где  $J_i = \{K : y_K = i\}$  - множества связанных входов  $i$ -го элемента;  $\alpha_K$  - веса связей, то отношение входа и выхода  $i$ -го элемента описывается следующим уравнением:

$$y_i(t) = F_i[u_i(t) + \sum_{K \in J_i} \alpha_K \cdot y_i(t)], i \in N$$

Целью алгоритма обучения является настройка весов связей  $\alpha_c$  таким образом, что бы минимизировать функцию потерь  $E(y_1, \dots, y_n, u_1, \dots, u_n)$ , которая представляет собой функцию ошибки системы.

Обучение нейронных сетей заключается в минимизации ошибки системы управления. Это осуществляется за счет настройки весов связей  $\alpha_k$  нейронной сети.

Если система описывается уравнением (28), то веса связей  $\alpha_K$  настраиваются по следующему правилу:

$$\dot{\alpha}_K = F'_{exK}[x_{exK}] \cdot \left( \frac{y_{exK}}{y_{exK}} \right) \sum_{S \in Q_{выхЛ}} \alpha_S \cdot \dot{\alpha}_S - \gamma \cdot F'_{exK}[x_{exK}] \cdot y_{exK} \cdot \frac{\partial E}{\partial y_{exK}}, \quad (29)$$

где  $\gamma > 0$  - коэффициент, определяющий скорость обучения;  $F'_{exK}[x_{exK}]$  - производная Фреше;  $E$  - функция потерь (ошибка)  $k \in K$ .

При условии, что уравнение (29) имеет единственное решение для  $\alpha_k$ , где функция потерь  $E(y_1, \dots, y_k; u_1, \dots, u_n)$  будет монотонно убывать во времени и будет удовлетворяться следующее равенство:

$$\dot{\alpha}_k = -\gamma \frac{\delta E}{\delta \alpha_k}, k \in K$$

Математически нейросетевой алгоритм обучения представим в виде:

$$Pn = \sum_{s \in Dn} \omega_s \cdot r_{pres}$$

$$r_n = \sigma(pn),$$

где:  $n$  – индекс нейрона;  $s$  – индекс синапса;  $Dn$  – набор входных синапсов нейрона  $n$ ;  $pres$  и  $post$  – пресинаптический и постсинаптический нейрон, соответствующий синапсу  $s$ ;  $\omega_s$  – вес синапса  $s$ ;  $pn$  – мембранный потенциал нейрона  $n$ ;  $r_n$  – частота возбуждения нейрона  $n$ ;  $\sigma$  – функция активации типа сигмоид, которая представляется виде:

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

При этом вес синапсов определяется по формуле:

$$\dot{\omega}_s = r_{pres} (\varphi_{posts} \sigma(-P_{posts}) + \gamma \cdot f_{posts}),$$

где  $\varphi_n = \sum_{s \in A_n} \omega_s \cdot \dot{\omega}_s$ ,  $\gamma$  – коэффициент непосредственной обратной связи

для всех нейронов,  $\varphi_n$  – сигнал непосредственной обратной ошибки.

Следует отметить, что данный алгоритм обучения эквивалентен алгоритму обратного распространения ошибки, но для передачи ошибки от выхода сети к ее входу не требуется применения нейросети с обратным распространением.

**Обсуждение полученных результатов.** Разработанная система синтеза по предложенной методике обладают способностью к пониманию и обучению в отношении объекта управления, возмущений, внешней среды, условий работы. На данном этапе искусственные нейронные сети, благодаря своим способностям к самоорганизации и возможности



адаптации обучению, рассматриваются как перспективные средства для интеллектуальных систем.

Таким образом, объединение положительных свойств нейронных сетей и нечетких моделей позволяет эффективно решать задачи управления сложными динамическими объектами в условиях неопределенности.

**Заключение.** В работе предложена адаптивная нейронечеткая система управления нелинейным динамическим объектом, содержащая идентификатор и регулятор, построенные на основе нечеткой модели Сугено. Разработаны алгоритмы структурной и параметрической идентификации, которые наряду с методом интерактивной применялись для адаптации моделей. Предложено объединение положительных свойств нейронных сетей и нечетких моделей, позволяющее эффективно решать задачи управления сложными динамическими объектами в условиях неопределенности.

### Список литературы

1. C. Peraza, F. Valdez, M. Garcia, P. Melin, O. Castillo, A New Harmony Search Algorithm Using Fuzzy Logic for Dynamic Parameter Adaptation, *Algoritms*, vol. 9, no 4, 2016, DOI: 10.3390/a9040069.
2. G. Fargione, D. Tringali, G. Risitano, A fuzzy-genetic control system in the ABS for the control of semi-active vehicle suspensions, *Mechatronics*, vol. 39, no. 89, 2016, DOI: 10.1016/j.mechatronics.2016.08.004.
3. H. Abounaser, I. Talkhan, A. Fahmy, A Parallel Fuzzy-Genetic Algorithm for Classification and Prediction, *International Journal Of Advanced Computer Science and Application*, vol. 7, no. 10, 2016, DOI: 10.14569/IJACSA.2016.071022.
4. I. Siddikov, Z. Iskandarov, Synthesis of adaptive-fuzzy control system of dynamic in conditions of uncertainty of information // *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. Vol. 5. Issue 1. January 2018. pp. 5089-5093.
5. L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets. Information Control", vol. 8, 1965, 338-353.

6. M.-Y. Chou, W.-H. Lee, C.-H. Wang, C.-T. Pang, On the fuzzy genetic algorithm, *Journal Of Nonlinear And Convex Analysis*, vol. 17, no. 5, 2016, 921-929.
7. R.J. Kuo, B.S. Wibowo, F.E. Zulvia, Application of a fuzzy and colony system to solve the dynamic vehicle routing problem with uncertain service time, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 40, no. 23-24, 2016, 9990-10001, DOI: 10.1016/j.apm.2016.06.025.
8. А.В. Медведев, Основы теории адаптивных систем. Красноярск, Сибирский государственный аэрокосмический университет, 2015.
9. А.Д. Братусь, Синтез новых оптимальных и адаптивных систем. - М.:Компания Спутник+,2002. 221 с.
10. В.В. Круглов, Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, Н.Н. Борисов. - М.:Горячая линия –Телеком,2001.-382 с.
11. В.Я. Ротач, Теория автоматического управления /В.Я.Ротач.-М.: МЭИ,2008.-396 с.
12. Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский, Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы, пер.с польск. И.Д. Рудинского. - М.: Горячая линия –Телеком. 2006. -452 с.
13. Д.П. Ким, Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М.:Физматлит, 2004. -464 с.
14. И.Ю. Тюкин, Алгоритмы адаптации в конечной форме для нелинейных динамических объектов // Автоматика и Телемеханика. — 2003. — Т. 64, № 6. — С. 951-974.
15. И.Х. Сиддигов, Ю.А. Жукова, Имитационное моделирование системы управления динамическим объектом на основе синергетического подхода //«Автоматизация. Современные Технологии» №1, 2018 С. 22-25.

## References

1. C. Peraza, F. Valdez, M. Garcia, P. Melin, O. Castillo, A New Harmony Search Algorithm Using Fuzzy Logic for Dynamic Parameter Adaptation, *Algoritms*, vol. 9, no 4, 2016, DOI: 10.3390/a9040069.
2. G. Fargione, D. Tringali, G. Risitano, A fuzzy-genetic control system in the ABS for the control of semi-active vehicle suspensions, *Mechatronics*, vol. 39, no. 89, 2016, DOI: 10.1016/j.mechatronics.2016.08.004.
3. H. Abounaser, I. Talkhan, A. Fahmy, A Parallel Fuzzy-Genetic Algorithm for Classification and Prediction, *International Journal Of Advanced Computer Science and Application*, vol. 7, no. 10, 2016, DOI: 10.14569/IJACSA.2016.071022.
4. Siddikov, Z. Iskandarov, Synthesis of adaptive-fuzzy control system of dynamic in conditions of uncertainty of information // *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. Vol. 5. Issue 1. January 2018. pp. 5089-5093.
5. L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets. Information Control", vol. 8, 1965, 338-353.
6. M.-Y. Chou, W.-H. Lee, C.-H. Wang, C.-T. Pang, On the fuzzy genetic algorithm, *Journal Of Nonlinear And Convex Analysis*, vol. 17, no. 5, 2016, 921-929.
7. R.J. Kuo, B.S. Wibowo, F.E. Zulvia, Application of a fuzzy and colony system to solve the dynamic vehicle routing problem with uncertain service time, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 40, no. 23-24, 2016, 9990-10001, DOI: 10.1016/j.apm.2016.06.025.
8. Medvedev A.V. *Osnovy teorii adaptivnyh sistem [Fundamentals of the Theory of Adaptive Systems]*. Krasnoyarsk, Sibirskiy gosudarstvennyy aerokosmicheskiy universitet, 2015.
9. A.D. Bratus, *Sintez novyx optimalnyx i adaptivnyx system*. –M.:Kompaniya Sputnik+, 2002. 221 s.
10. V.V. Kruglov, *Iskusstvennye neyronnye seti. Teoriya I praktika / V.V. Kruglov, N.N. Borisov*. – M.:Goryachaya liniya – Telekom, 2001. -382 s.

11. V.Ya. Rotach, Teoriya avtomaticheskogo upravleniya / V.Ya. Potach. – M.:MEI, 2008. -396 s.
12. D. Rutkovskaya, M. Pilinskiy, L. Rutkovskiy, Neyronnye seti, genetichesye algoritmi I nechetkiye sistemy, per.c polsk. I.D. Rudinckogo. –M.:Goryachaya liniya – Telekom. 2006. -452 s.
13. D.P. Kim, Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T.2. Mnogomernye, nelineynye, optimalnye i adaptivnye sistemy. M.:Fizmatlit, 2004. -464 s.
14. I.Yu. Tyukin, Algoritmi adaptasiya v konechnoy forme dlya nelineynykh dinamicheskix obektov // Avtomatika i Telemexanika. – 2003. T. 64, № 6. — S. 951-974.
15. I.X. Siddikov, Yu.A. Jukova, Imitatsionnoe modelirovanie sistemy upravleniya dinamicheskim obektom na osnove sinergeticheskogo podxoda // “Avtomatizatsiya. Sovremennye Texnologii” №1, 2018 S. 22-25.

### **Сведения об авторах / Information about authors**

#### **Isomiddin SIDDIKOV**

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Information processing systems and management”, Tashkent State Technical University, Tashkent, st. University, 2.

*\*Corresponding author.* E-mail: [isamiddin54@gmail.com](mailto:isamiddin54@gmail.com)

#### **Dilnoza UMURZAKOVA**

PhD student of the department “Information processing systems and management”, Tashkent State Technical University, Tashkent, st. University, 2, <https://orcid.org/0000-0003-1689-5630>.

*\*Corresponding author.* E-mail: [umurzakovadilnoz@gmail.com](mailto:umurzakovadilnoz@gmail.com)

## УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Журнал формируется по разделам, отражающим основные направления исследований в области железнодорожного транспорта:

- Путь и путевое хозяйство;
- Подвижной состав и тяга поездов;
- Электроснабжение, электроподвижной состав, автоматика и телемеханика;
- Организация перевозочного процесса и транспортная логистика;
- Техносферная безопасность;
- Инженерные сооружения и материалы;
- Информационные технологии и информационная безопасность;
- Бизнес и управление.

Язык издания – русский и английский.

---

## ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ

### ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТАТЬИ (на русском и английском языках)

- **Наименование статьи.** Должно кратко отражать содержание статьи. Не рекомендуется использовать сокращения и аббревиатуры.
- **Аффилиция.** Указываются: фамилия, имя, отчество авторов, ученая степень, звание, должность, официальное полное название организаций и английский вариант названия, адрес электронной почты хотя бы одного из авторов.
- **Аннотация.** Включает: предмет, тему, цель, гипотезу исследования, методы, эксперименты, основные результаты, область их применения, практическое значение, выводы.
- **Ключевые слова.** От 5 до 15 основных терминов.

### РЕКОМЕНДУЕМАЯ СТРУКТУРА ОСНОВНОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

- Введение
- Теория, данные и методы исследования, модели, технические и технологические разработки, эксперименты.
- Результаты исследования и их обсуждение.
- Список литературы на русском и английском языках.

### ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

- Электронная версия статьи **Microsoft Word**, при настройках полей страницы формата А4 – по умолчанию.
- Рисунки и фотографии максимального размера в 150х235 мм, вставляемые в статью, выполняются в формате, позволяющем производить их редактирование и изменение размеров без дополнительного обращения к авторам. Рисунки, выполненные в **Microsoft Excel**, должны быть продублированы исходным файлом в формате \*.xls с соблюдением требований к цвету.
- При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц СИ.

**Статьи проходят обязательное научное рецензирование.**

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. По вопросам публикации статей обращаться: 100167, Республика Узбекистан, г. Ташкент, ул. Адилходжаева, дом №1, ком.: 333.  
Телефоны: +998712990026; e-mail: [nauka@tashiit.uz](mailto:nauka@tashiit.uz)

## DEAR AUTHORS!

The journal is divided into sections, reflecting the main directions of research in the field of railway transport:

- Path and track facilities;
- Rolling stock and traction of trains;
- Power supply, electric rolling stock, automation and telemechanics;
- Organization of transportation process and transport logistics;
- Technosphere safety;
- Engineering structures and materials;
- Information technologies and information security;
- Business and management.

The language of publication is Russian and English.

---

## REQUIREMENTS FOR ARTICLES

### PRELIMINARY ELEMENTS OF THE ARTICLE (in Russian and English)

- **Title of the article.** Should briefly reflect the content of the article. It is not recommended to use abbreviations and shortenings.
- **Affirmation.** Specified: surname, name, patronymic of authors, academic degree, title, position, official full name of organizations and the English version of the name, e-mail address of at least one of the authors.
- **Annotation.** It includes: subject, topic, goal, research hypothesis, methods, experiments, main results, their field of application, practical significance, conclusions.
- **Keywords.** From 5 to 15 basic terms.

### RECOMMENDED STRUCTURE OF THE MAIN PART OF THE ARTICLE

- Introduction
- Theory, data and research methods, models, technical and technological developments, experiments.
- Research results and discussion.
- References in Russian and English

## REQUIREMENTS FOR ARTICLE

- The electronic version of the article Microsoft Word, with the settings of the A4 page margin fields - by default.
- Drawings and photographs of a maximum size of 150x235 mm inserted into an article are made in a format that allows editing and resizing them without additional reference to the authors. Figures made in Microsoft Excel should be duplicated with the source file in \* .xls format with the observance of color requirements.
- When preparing a manuscript, one should be guided by the International System of Units SI.

### Articles are subject to mandatory scientific review.

The editors reserve the right to reject articles that do not meet the specified requirements.

For publication of articles contact: 100167, Republic of Uzbekistan, Tashkent, st. Adilkhodzhaev, Building 1, room.: 333.

Phones: +998712990026; e-mail: nauka@tashiit.uz



**Темир йўл транспорти: долзарб масалалар ва инновациялар**  
**Илмий-техник журнал**

**Железнодорожный транспорт: актуальные задачи и инновации**  
**Научно-технический журнал**

**Railway transport: Actual Tasks and innovations**  
**Scientific and technical journal**

Нашрга 2019 йил 1.07 да рухсат берилди.  
Қоғоз формати 84x108/16. Ҳажми 5,25 б.т.  
Адади 100. Буюртма №36-1/2019  
ТошТЙМИ босмахонасида нашрдан чиқди  
Тошкент, Одилхўжаев кўчаси, 1.

Подписан в печать 1.07 2019 год.  
Формат бумаги 84x108/16. Объем 5,25 п.л.  
Тираж 100. Заказ №36-1/2019  
Отпечатан в типографии ТашИИТ  
Ташкент, ул. Адылходжаева, 1.