

УДК 004.8

Н.Р. Кондратенко, О.В. Чеборака, О.А. Ткачук

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

## ІНТЕРВАЛЬНІ НЕЧІТКІ МОДЕЛІ ТИПУ-2 В ЗАДАЧАХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ З БАГАТЬМА ВХОДАМИ ТА ВИХОДАМИ

Розглянуто інтервальні нечіткі моделі типу-2 в задачах ідентифікації об'єктів з багатьма входами та виходами. Запропоновано математичну модель, яка може бути основою для нечіткого логічного порадника, що дозволить підвищити якість ідентифікації та діагностики складних об'єктів з багатьма входами та виходами в технічних системах. Запропоновано генетичний алгоритм навчання інтервальної нечіткої моделі типу-2 з багатьма входами та виходами, який використовує чотири схеми схрещування: одноточкове, багатоточкове, зважене середнє та зважене середнє арифметичне, – і дві схеми мутації: рівномірна та гаусова.

**Ключові слова:** інтервальна нечітка модель типу-2, об'єкт з багатьма входами та виходами, нечіткий логічний порадник, генетичний алгоритм.

### Вступ

Нечіткі моделі є основою для побудови універсальних апроксиматорів [1, 2, 4, 5]. Ці моделі використовують для свого функціонування основні поняття теорії нечітких множин, нечіткі правила та нечітке логічне виведення. В залежності від степеня нечіткості нечітких множин, що враховується при побудові нечіткої моделі, розрізняють нечіткі моделі типу-1, загальні моделі типу-2 та інтервальні типу-2. Нечіткі моделі типу-1 будуються на основі нечітких множин з чіткими значеннями степенів належності, вони знайшли своє застосування у різноманітних областях, але такі нечіткі моделі дають на виході лише чітке(точкове) значення. Інтервальні нечіткі моделі типу-2 будуються на основі нечітких множин з інтервальними значеннями степенів належності. Ці моделі на відміну від нечітких моделей типу-1 дають на виході точкові та інтервальні значення; вони достатньо ефективно обробляють різні види невизначеностей та потребують суттєво менше обчислювальних затрат, ніж загальні нечіткі моделі типу-2 [2, 3, 6, 7]. Виходячи з вище поданих відомостей, запропонуємо для розв'язання задачі ідентифікації об'єктів з багатьма входами та виходами обчислювальні структури, що будуються на основі інтервальних нечітких моделей типу-2. Обґрунтуємо такий підхід.

Всі технічні системи, як правило, можна поділити на два класи. Перший клас – системи та об'єкти, що описуються, як правило, лінійними моделями, які функціонують в стаціонарних режимах та характеризуються передбачуваною поведінкою. Другий – об'єкти та системи, які працюють в напружених, нештатних умовах і описуються, як правило, нелінійними рівняннями. Для технічних систем саме в нештатних режимах вирішення питань діагностики до теперішнього часу залишається відкритим та маловивченим. Фахівці відмічають, що

порушення роботи в таких системах проявляються не тільки в погіршенні основних параметрів, що контролюються, але й в їх інтерпретації за допомогою суб'єктивних ознак [8]. Прикладами складних технологічних об'єктів є енергосилові установки, авіаційні та судові двигуни, що контролюються за багатьма параметрами. Як наслідок вірність діагнозу та час, який йде на його отримання визначаються досвідом та інтуїцією фахівців, знання яких важко формалізуються, містять невизначеності відносно ознак конкретних відмов технічного об'єкту. Тому є доцільним, враховуючи складність об'єкта ідентифікації, для розв'язання задачі ідентифікації, розглянути інтервальну нечітку модель типу-2, яка буде входити до складу автоматизованої системи діагностики як нечіткий логічний порадник.

### Постановка завдання

Поставимо задачу розробити математичну модель, яка може бути основою для нечіткого логічного порадника, за допомогою якого можна буде розв'язувати задачу ідентифікації складних об'єктів.

Нечіткий логічний порадник є інтервальною нечіткою моделлю типу-2 з багатьма входами та виходами, інтервальні функції належності типу-2 якої настраюються за допомогою генетичного алгоритму.

### Математична модель та методика досліджень

Представимо математичну модель для розв'язання поставленої задачі у вигляді нечіткої моделі ідентифікації. Цю модель можна представити у вигляді структури, зображеної на рис. 1.

Модель відображає чіткі входи  $x = (x_1, \dots, x_p)$  у інтервальні та чіткі виходи:

$$Y = ([y_{1l}, y_{1r}], \dots, [y_{nl}, y_{nr}]) \quad i \quad y = (y_1, \dots, y_n).$$

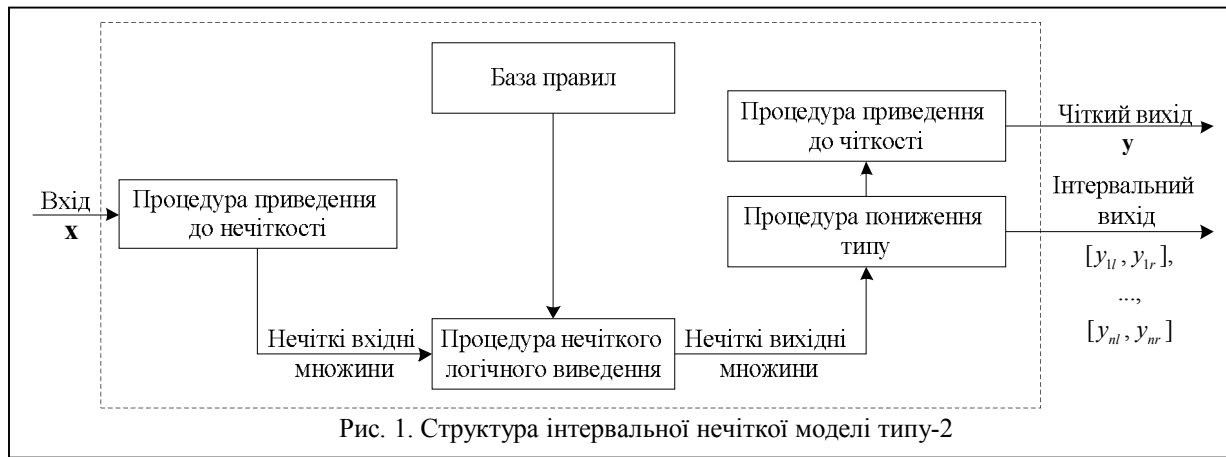


Рис. 1. Структура інтервальної нечіткої моделі типу-2

Для опису нечітких термів лінгвістичних змінних будемо використовувати інтервальні нечіткі множини типу-2. Тоді математична модель представляє собою інтервальну нечітку модель типу-2, що включає базу правил (нечітку базу знань), процедуру приведення до нечіткості, процедуру нечіткого логічного виведення, процедуру зниження типу та процедуру приведення до чіткості (рис. 1).

Базу правил нечіткої моделі будемо визначати таким чином:

$$R^1: \text{ЯКЩО } x_1 = \tilde{F}_1^1 \text{ I } \dots \text{ I } x_p = \tilde{F}_p^1,$$

$$\text{ТО } y_1 = G_1^1, \dots, y_n = G_n^1;$$

...

$$R^l: \text{ЯКЩО } x_1 = \tilde{F}_1^l \text{ I } \dots \text{ I } x_p = \tilde{F}_p^l,$$

$$\text{ТО } y_1 = G_1^l, \dots, y_n = G_n^l;$$

...

$$R^M: \text{ЯКЩО } x_1 = \tilde{F}_1^M \text{ I } \dots \text{ I } x_p = \tilde{F}_p^M,$$

$$\text{ТО } y_1 = G_1^M, \dots, y_n = G_n^M,$$

де  $\tilde{F}_k^l$ ,  $k=1, \dots, p$ ,  $l=1, \dots, M$  – інтервальна нечітка множина типу-2  $k$ -го антецедента  $l$ -го правила;  $G_k^l$ ,  $k=1, \dots, n$ ,  $l=1, \dots, M$  – інтервальна множина типу-1  $k$ -го консеквента  $l$ -го правила, яка визначається крайньою лівою  $y_{kl}^l$  та крайньою правою  $y_{kr}^l$  точками:  $G_k^l = [y_{kl}^l, y_{kr}^l]$ ;  $M$  – число правил.

Для опису інтервальних нечітких множин типу-2 термів лінгвістичних змінних будемо використовувати гаусові первинні функції належності з невизначеним центром і сталим відхиленням або зі сталим центром та невизначеним відхиленням.

Гаусова первинна функція належності з невизначеним центром  $m \in [m_l, m_r]$  і сталим відхиленням  $\sigma$  визначається такою формулою [9]:

$$\mu_A(x) = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x - [m_l, m_r]}{\sigma} \right)^2}. \quad (1)$$

Гаусова первинна функція належності зі сталим центром  $m$  і невизначеним відхиленням  $\sigma \in [\sigma_l, \sigma_u]$  задається таким чином [9]:

$$\mu_A(x) = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x - m}{[\sigma_l, \sigma_u]} \right)^2}. \quad (2)$$

Графіки гаусових первинних функцій належності з невизначеним центром і сталим відхиленням (1) та зі сталим центром і невизначеним відхиленням (2) наведено на рис. 2 і 3 відповідно.

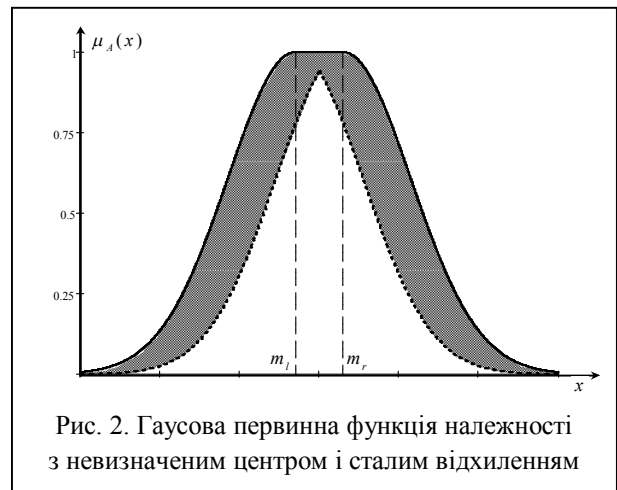


Рис. 2. Гаусова первинна функція належності з невизначеним центром і сталим відхиленням

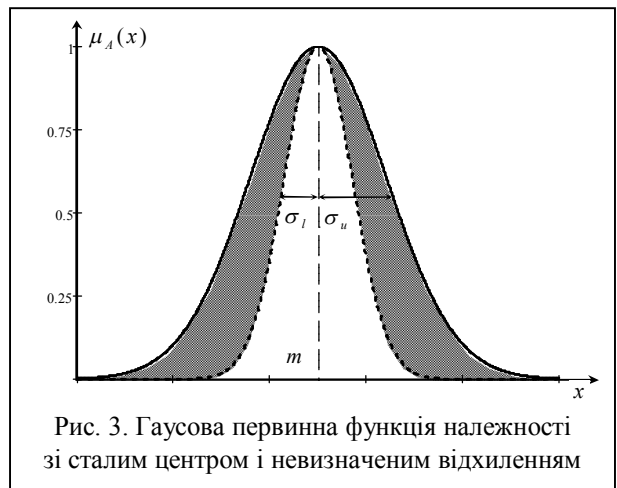


Рис. 3. Гаусова первинна функція належності зі сталим центром і невизначеним відхиленням

При обчисленні вихідних нечітких множин правил будемо використовувати t-норму мінімуму або алгебраїчного добутку. Тоді вихідна множина правила  $R^l$  визначається за формулою

$$\mu_{\tilde{B}^l}(y_k) = \int_{b^l \in [\underline{f}^l * \mu_{G^l}(y_k), \bar{f}^l * \mu_{G^l}(y_k)]} 1/b^l, \quad (3)$$

де  $*$  – оператор t-норми;  $\underline{f}^l$  і  $\bar{f}^l$  – нижня і верхня границі інтервалу активізації  $[\underline{f}^l, \bar{f}^l]$ , які визначаються такими формулами:

$$\underline{f}^l = \prod_{k=1}^p \mu_{\tilde{F}_k^l}(x_k); \quad (4)$$

$$\bar{f}^l = \prod_{k=1}^p \bar{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k), \quad (5)$$

де  $\mu_{\tilde{F}_k^l}(x_k)$  і  $\bar{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)$  – нижня і верхня степені належності  $\mu_{\tilde{F}_k^l}(x_k)$ .

Вихідні нечіткі множини правил  $\tilde{B}^l$  без об'єднання в єдину множину будемо відразу подавати на блок пониження типу нечіткої моделі.

Пониження типу вихідних інтервальних нечітких множин типу-2 до інтервальних типу-1 будемо виконувати методом центру множин, що виражається формулою

$$Y_k(\mathbf{x}) = [y_{kl}, y_{kr}] = \int_{y_{kl} \in [y_{kl}^{G^1}, y_{kr}^{G^1}]} \dots \int_{y_{kr} \in [y_{kl}^{G^M}, y_{kr}^{G^M}]} \dots \int_{f^l \in [\underline{f}^l, \bar{f}^l]} \dots \int_{f^M \in [\underline{f}^M, \bar{f}^M]} 1 / \left( \sum_{l=1}^M f^l y_{kl}^1 / \sum_{l=1}^M f^l \right), \quad (6)$$

де  $Y_k(\mathbf{x})$ ,  $k=1, \dots, n$  – інтервальна множина, що визначається крайніми точками  $y_{kl}$  і  $y_{kr}$ .

Для обчислення крайніх точок  $y_{kl}$  і  $y_{kr}$  використовуємо алгоритм Карніка-Менделя [2].

Приведення до чіткості виконується за формулою:

$$y_k(\mathbf{x}) = \frac{y_{kl} + y_{kr}}{2}. \quad (7)$$

Для навчання описаної вище інтервальної нечіткої моделі типу-2 будемо використовувати генетичний алгоритм.

Структура хромосоми, яка описує інтервальну нечітку модель типу-2, зображена на рис. 4.

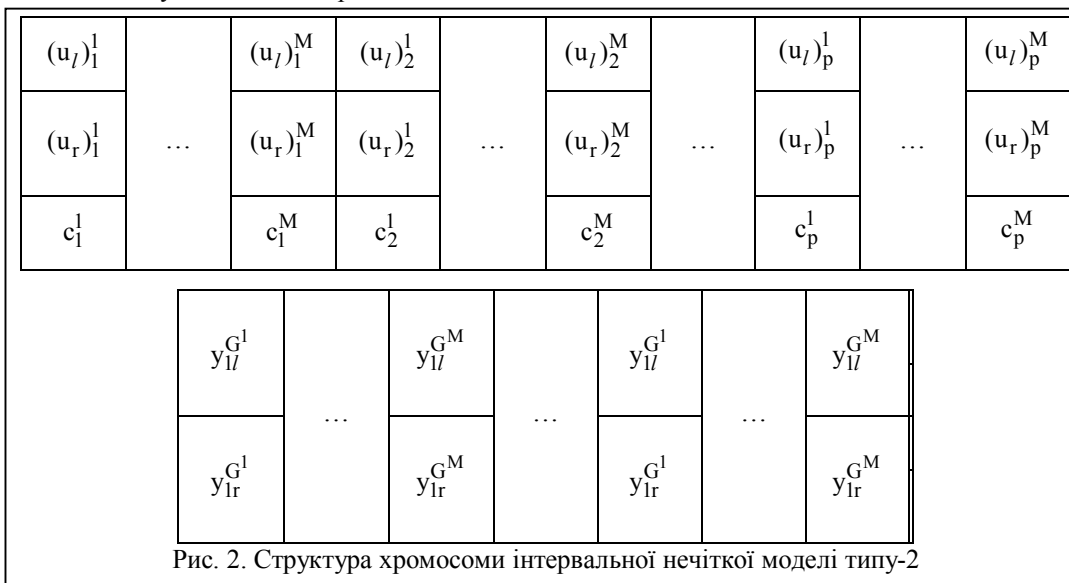


Рис. 2. Структура хромосоми інтервальної нечіткої моделі типу-2

У наведеній хромосомі  $u$  позначає невизначений параметр первинних функцій належності (центр  $m$  або відхилення  $\sigma$ ), який визначається крайньою лівою  $u_l$  та крайньою правою  $u_r$  точками:  $u \in [u_l, u_r]$ , а  $c$  – визначений параметр первинних функцій належності.

Схрещування хромосом виконується за чотирма схемами: односточкове схрещування, багатоточкове схрещування, зважене середнє та зважене середнє арифметичне, – а мутація хромосом – за двома схемами: рівномірна та гаусова [10]. Блок-схема генетичного алгоритму представлена на рис. 5.

Для оцінювання значень пристосованості рішень запропонуємо критерій, який дозволяє оцінювати якість моделі з багатьма виходами:

$$MRMSE_{tr} = \frac{1}{\sqrt{N_{tr}}} \sum_{k=1}^n \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{tr}} (y_{ki} - y_{ki}^e)^2}, \quad (8)$$

де  $y_{ki}^e$  – експериментальне значення  $k$ -го вихідного параметра  $i$ -ї навчальної пари;  $N_{tr}$  – число навчальних пар.

Задача навчання запропонованої нечіткої моделі полягає у пошуку такого рішення, при якому  $MRMSE_{tr} \rightarrow \min$ .

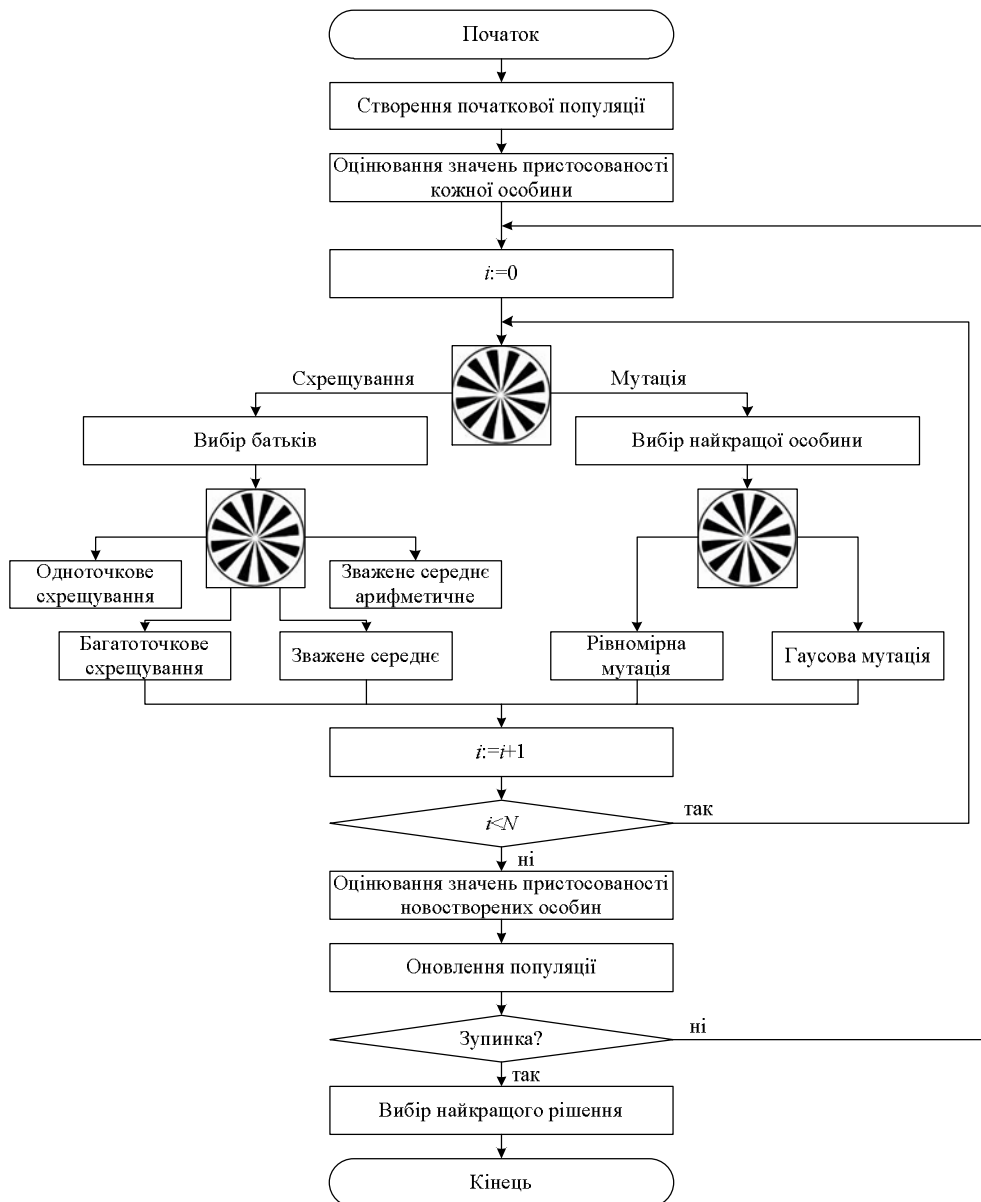


Рис. 5. Блок-схема генетичного алгоритму

Після навчання моделі вибір кращого рішення виконується за допомогою аналогічного критерію на тестовій вибірці.

Запропонована модель може виконувати функції помічника експерта з питань ідентифікації складних об'єктів в технічних системах. Для підвищення якості прийняття рішень експерту необхідно враховувати оцінку невизначеності вихідних параметрів моделі, яку дає інтервальна нечітка модель типу-2.

### Висновки

У роботі запропоновано математичну модель, яка може бути основою для нечіткого логічного порадника, що дозволить підвищити якість ідентифікації та діагностики складних об'єктів з багатьма входами та виходами в технічних системах. Це досягнуто шляхом використання інтервальних нечітких множин типу-2, що дозволяє обчислити нижню та верхню границі вихідних параметрів

стану складного об'єкту, і таким чином, надати додаткову інформацію для експерта, що приймає кінцеве рішення. Для оптимізації параметрів запропонованої моделі розроблено генетичний алгоритм. Подальші дослідження будуть пов'язані з побудовою на основі запропонованих нечітких моделей методів побудови нечітких логічних систем та дослідження об'єктів з багатьма входами та виходами у випадку нечітких вхідних даних.

### Список літератури

1. Зайченко Ю.П. *Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах : учеб. пособ. [для студ. выс. учеб. зав.] / Ю.П. Зайченко. – К. : Издательский Дом «Слово», 2008. – 344 с.*
2. Mendel J.M. *Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions / J.M. Mendel. – NJ: Prentice Hall, 2001.*
3. Mendel J.M. *Advances in Type-2 Fuzzy Sets and Systems/ J. M. Mendel // Information Sciences. – 2007. – Vol. 177. – P. 84-110.*

4. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / А.П. Ротштейн. – Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 320 с.

5. Ротштейн О.П. Диагностика на базі нечітких відношень в умовах невизначеності: моногр. / О.П. Ротштейн, Г. Б. Ракитянська. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 275 с.

6. Кондратенко Н.Р. Використання інтервальних функцій належності в задачах класифікації ендокринних захворювань / Н.Р. Кондратенко, С.М. Куземко, О.В. Чеборака // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2005. – № 3. – С. 85-90.

7. Кондратенко Н.Р. Нечіткі множини в задачах прогнозування часових послідовностей / Н.Р. Кондратенко, О.В. Чеборака // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 6. – С. 52-57.

8. Гузик В.Ф. Статистическая диагностика нерав-

новесных объектов / В.Ф. Гузик, В.И. Кидалов, А.П. Самойленко – СПб.: Судостроение, 2009. – 304 с.

9. Кондратенко Н.Р. Дослідження можливостей узагальнювальної інтервальної типу-2 нечіткої моделі для прогнозування часових послідовностей / Н.Р. Кондратенко, О.В. Чеборака // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 6. – С. 22-27.

10. Чеборака О.В. Інформаційна технологія інтервального прогнозування часових послідовностей на основі нечітких множин типу-2: дис. канд. техн. наук: 05.13.06 / Чеборака Олександр Валерійович. – Вінниця, 2009. – 217 с.

Надійшла до редколегії 28.04.2011

**Рецензент:** канд. екон. наук, доц. І.О. Золотарьова, Харківський національний економічний університет, Харків.

#### **ИНТЕРВАЛЬНЫЕ НЕЧЕТКИЕ МОДЕЛИ ВТОРОГО ТИПА В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ СО МНОГИМИ ВХОДАМИ И ВЫХОДАМИ**

Н.Р. Кондратенко, А.В. Чеборака, О.А. Ткачук

*Рассмотрены интервальные нечеткие модели второго типа в задачах идентификации объектов со многими входами и выходами. Предложена математическая модель, которая может быть основой для нечеткого логического советчика, что позволит повысить качество идентификации и диагностики сложных объектов со многими входами и выходами в технических системах. Предложен генетический алгоритм обучения интервальной нечеткой модели второго типа со многими входами и выходами, который использует четыре схемы скрещивания: одноточечное, многоточечное, взвешенное среднее и взвешенное среднее арифметическое, – и две схемы мутации: равномерная и гауссова.*

**Ключевые слова:** интервальная нечеткая модель второго типа, объект со многими входами и выходами, нечеткий логический советчик, генетический алгоритм.

#### **INTERVAL TYPE-2 FUZZY MODELS CONCERNING IDENTIFICATION PROBLEMS OF MULTIPLE-INPUT MULTIPLE OUTPUT OBJECTS**

N.R. Kondratenko, O.V. Cheboraka, O.A. Tkachuk

*Interval type-2 fuzzy models in identification problems of multiple-input multiple output objects are considered. The mathematical model that can be the base of fuzzy logic adviser is proposed. This model helps to increase identification and diagnostic quality of complex multiple-input multiple output objects in technical systems. The genetic algorithm of multiple-input multiple output interval type-2 fuzzy model is proposed. This algorithm uses four crossover schemes (single point, multiple point, intermediate, arithmetic) and two mutation schemes (uniform and gaussian).*

**Keywords:** interval type-2 fuzzy model, multiple-input multiple output object, fuzzy logic adviser, genetic algorithm.