

УДК 681.5.004

Р.Е. ВРУБЛЕВСКИЙ

**ПОСТРОЕНИЕ БАЗЫ НЕЧЕТКИХ ПРАВИЛ
ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ANFIS СЕТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
РЕЗУЛЬТАТА ПРОЦЕССА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ**

В статье изложен метод построения базы нечетких правил на основе численных данных для интеллектуальной системы управления выбором режимов магнитно-импульсной обработки на основе сети ANFIS. Данный метод позволит снизить время построения базы правил модуля управления процессом.

Ключевые слова: база нечетких правил; интеллектуальная система управления; магнитно-импульсная обработка.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время принимает особое значение проблема повышения ресурса надежности инструмента и деталей машин. Одним из возможных и перспективных путей решения этой проблемы является магнитно-импульсная обработка (МИО), которая обладает рядом преимуществ: простота концентрации электромагнитной энергии на изделии, быстрое ее аккумуляирование материалом рабочих элементов детали, а также оперативность повышения эксплуатационных характеристик (время обработки составляет 0,3...2,0 сек при незначительных энергетических затратах). Указанные преимущества магнитной обработки изделий по сравнению с другими способами упрочнения многократно подтверждались промышленным опытом в машиностроении, приборостроении, судостроении, а также в других областях народного хозяйства Украины и стран СНГ [1-4].

Сложностью практического применения МИО является необходимость настройки параметров режимов обработки с учетом особенностей конкретного изделия. Решение этой задачи возможно путем создания интеллектуальных систем управления МИО. Проблемой интеллектуальных систем управления МИО является создание модели процесса обработки. Возможным подходом к решению данной проблемы является использование методов искусственного интеллекта, в частности, нечетких нейронных сетей ANFIS для решения задач оптимизации режимов обработки и прогнозирования результатов МИО. Нечеткие нейронные сети ANFIS имеют много достоинств, однако недостатком является длительное наполнение их знаниями (построения базы правил) в процессе обучения.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ

Целью настоящей статьи является улучшение качества МИО металлических изделий, которое может быть достигнуто в случае рационального выбора режимов МИО с использованием нечеткой нейронной сети ANFIS.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Основными параметрами режимов МИО являются: напряженность магнитного поля H , время импульса в серии τ , число импульсов в серии n , интервал между импульсами в серии t , число серий импульсов Θ . Эти параметры варьируются в различных диапазонах для различных типов деталей. Для практической реализации адаптивного управления процессом МИО создаем базу правил для нечеткой системы управления МИО с пятью входными

величинами режимов МИО и одним выходом – стойкостью инструмента. Для этого необходимы обучающие данные в виде множества пар:

$$(x_1(i), x_2(i), x_3(i), x_4(i), x_5(i), d_1(i)), i = 1.2.3..., \quad (1)$$

где $x_1(i)$ – напряженность магнитного поля H ; $x_2(i)$ – время импульса в серии – τ ; $x_3(i)$ – число импульсов в серии – n ; $x_4(i)$ – интервал между импульсом в серии – t ; $x_5(i)$ – число серий импульсов – Θ ; $d_1(i)$ – ожидаемое (эталонное) значение выходного сигнала (стойкость обрабатываемого изделия).

Сформируем нечеткие правила для сети ANFIS управления МИО при обработке сверла из стали Р6М5 диаметром 4 мм. Для этого был проведен эксперимент на аппарате «Магнитрон-1», в ходе которого было обработано 250 сверл (сталь Р6М5, диаметр 4 мм) различными наборами параметров режимов МИО. Испытания на износ обработанных МИО сверл были проведены на сверлильном станке 2М112. Сверление производилось стальной плиты Сталь 40Х, толщиной 15 мм. Стойкость определяется по количеству просверленных отверстий испытуемым сверлом. Оценивалась стойкость в процентах, за 100 процентов бралась стойкость не обработанного МИО сверла. Полученные в результате эксперимента данные – 250 наборов параметров режимов МИО и полученные стойкости сверл для каждого набора параметров – были взяты для обучающей выборки.

Для решения задачи формирования нечетких правил для сети ANFIS выполним несколько шагов. Для начала разделим пространство входных (параметров режимов МИО) и выходных (стойкость сверла из стали Р6М5) сигналов на области. Определим степени принадлежности параметров МИО.

Из обучающей выборки, полученной вследствие эксперимента (250 наборов), выберем минимальное и максимальное значения каждого параметра режима и полученной в результате стойкости (табл. 1).

Таблица 1 – Минимальное и максимальное значения каждого параметра режима и полученной в результате стойкости

Режимы МИО сверла из стали Р6М5					Стойкость,* %
Напряженность поля, кА/м	Время импульса, сек	Число импульсов	Интервал между импульсами, сек	Число серий импульсов	
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	d
160...500	0,3...1,5	1...10	0,2...2	1...5	115...135

* – за 100 процентов берется стойкость необработанного МИО сверла

Определим интервалы, в которых находятся допустимые значения режимов. Воспользуемся таблицей 1 и выберем из нее соответственно минимальное и максимальное значения каждого параметра режимов обработки и полученной в результате стойкости.

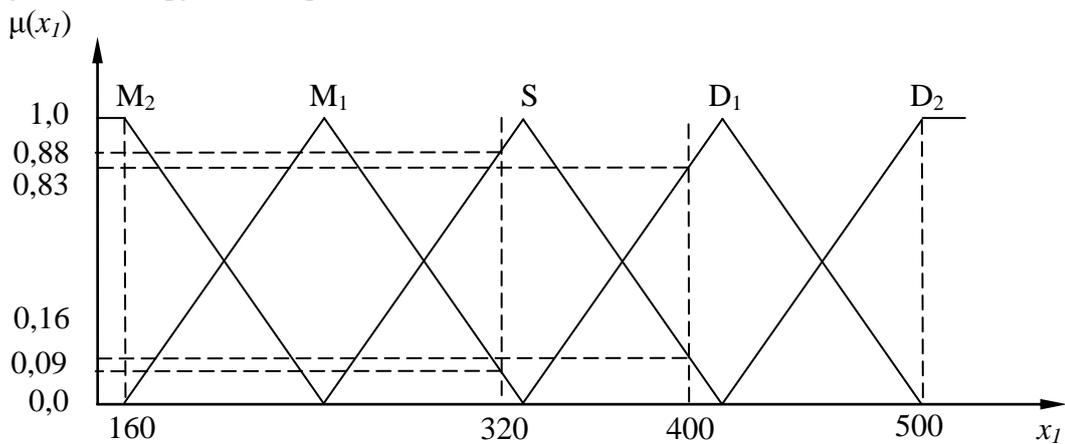
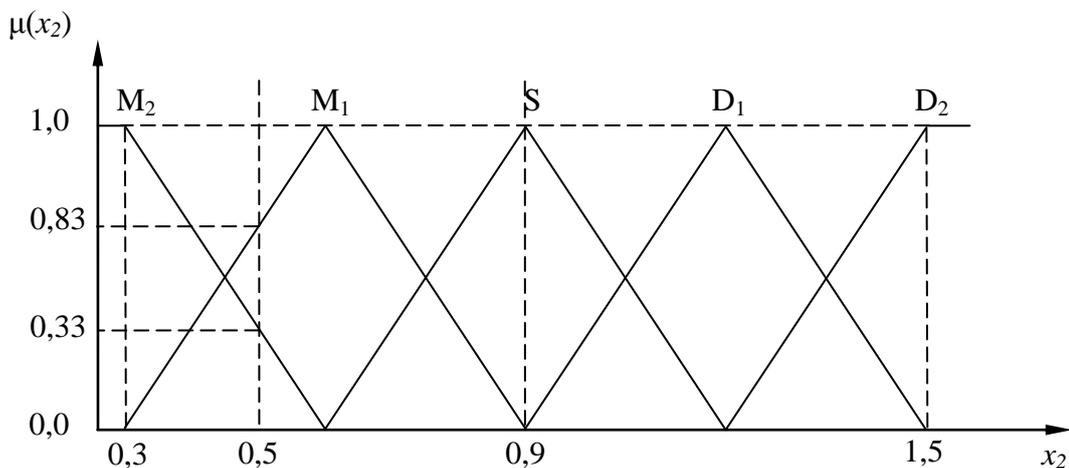
Каждый определенный таким образом интервал разделим на пять областей (отрезков) одинаковой длины. Отдельные области обозначим следующим образом: M_1 (Малый 1), M_2 (Малый 2), S (Средний), D_1 (Большой 1), D_2 (Большой 2) и для каждого из них возьмем треугольную функцию принадлежности.

Из обучающей выборки, полученной вследствие эксперимента, возьмем любые два набора параметров (из 250) режимов, подаваемых на установку «Магнитрон-1» (табл. 2).

Таблица 2 – Наборы обучающих данных из обучающей выборки

Наборы обучающих данных	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	d
$x_i(1)$	320	0,9	5	1,1	3	120
$x_i(2)$	400	0,5	6	0,2	2	126

Для определения степеней принадлежности выбранных двух наборов параметров МИО (из обучающей выборки) и получаемой в результате стойкости составим графики распределения на области (M_1 , M_2 , S , D_1 , D_2) и соответствующие им функции принадлежности (рис. 1-6). На оси Y диапазон значения функция принадлежности (μ) элемента множеству может принимать любые значения в интервале $[0, 1]$, на оси X находится разделение пространства входных и выходных сигналов на области и соответствующие им функции принадлежности.

Рисунок 1 – График распределения пространства входного сигнала x_1 на области и соответствующие ему функции принадлежностиРисунок 2 – График распределения пространства входного сигнала x_2 на области и соответствующие ему функции принадлежности

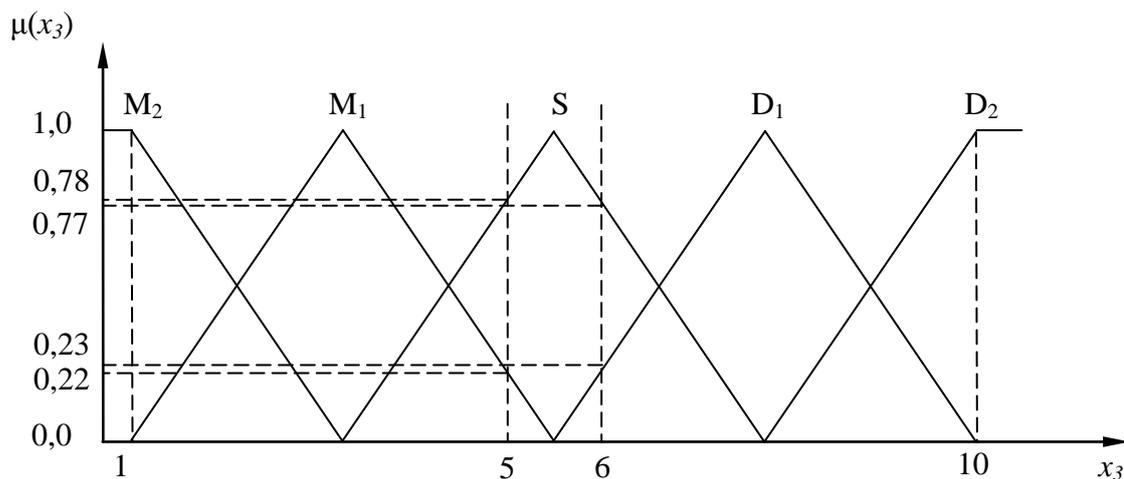


Рисунок 3 – График распределения пространства входного сигнала x_3 на области и соответствующие ему функции принадлежности

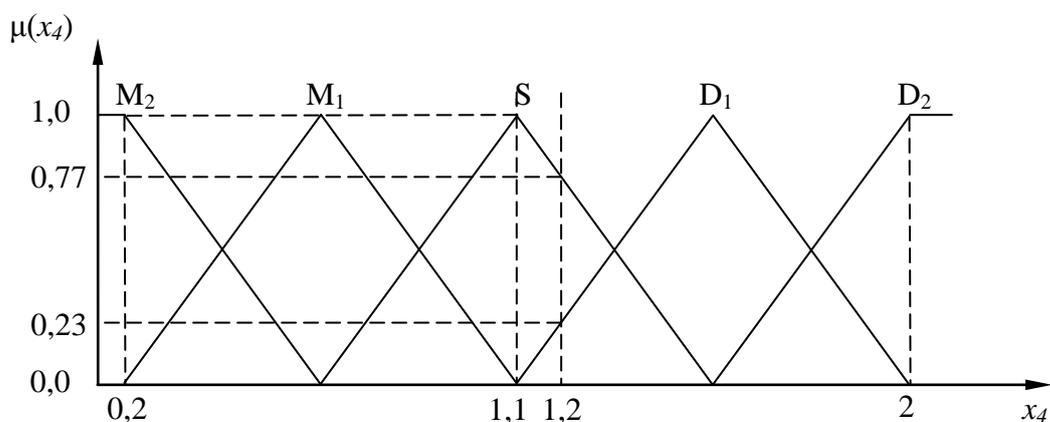


Рисунок 4 – График распределения пространства входного сигнала x_4 на области и соответствующие ему функции принадлежности

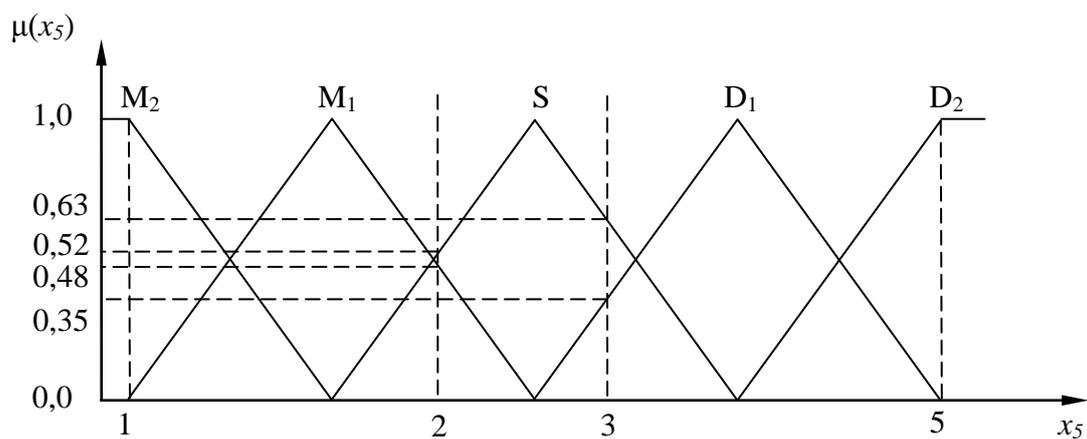


Рисунок 5 – График распределения пространства входного сигнала x_5 на области и соответствующие им функции принадлежности

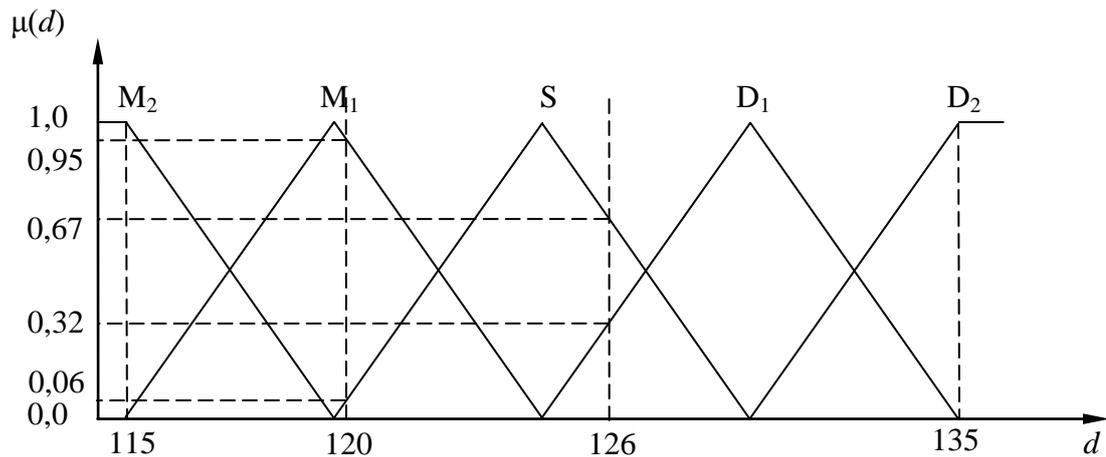


Рисунок 6 – График распределения пространства выходного сигнала (стойкость) d на области и соответствующие ему функции принадлежности

Следующий шаг – построим нечеткие правила на основе обучающих данных. Вначале определим степени принадлежности обучающих данных $x_1(i), x_2(i), x_3(i), x_4(i), x_5(i)$ и $d_1(i)$, к каждой области, выделенной на рисунках 1-6. Эти степени будут выражаться значениями функций принадлежности соответствующих нечетких множеств для каждой группы данных, которые определяются из графиков на рисунках 1-6 (табл. 3).

Таблица 3 – Степени принадлежности обучающих данных к областям распределения

Области распределения	Параметры режимов МИО и полученная стойкость											
	1-й набор обучающих данных						2-й набор обучающих данных					
	$x_1(1)$	$x_2(1)$	$x_3(1)$	$x_4(1)$	$x_5(1)$	$d(1)$	$x_1(2)$	$x_2(2)$	$x_3(2)$	$x_4(2)$	$x_5(2)$	$d(2)$
M_2	0	0	0	0	0	0	0	0,33	0	0	0	0
M_1	0,09	0	0,22	0	0,48	0,95	0	0,82	0	0	0	0
S	0,88	1	0,78	1	0,52	0,66	0,16	0	0,77	0,77	0,63	0,67
D_1	0	0	0	0	0	0	0,83	0	0,23	0,23	0,35	0,32
D_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Теперь сопоставим обучающие данные $x_1(i), x_2(i), x_3(i), x_4(i), x_5(i)$ и $d_1(i)$ к областям, в которых они имеют максимальные степени принадлежности. Окончательно для каждой пары обучающих данных запишем одно правило, т.е.:

$$\begin{aligned}
 & (x_1(1), x_2(1), x_3(1), x_4(1), x_5(1); d_1(1)) \Rightarrow \\
 & \Rightarrow \{x_1(1)[\text{max} : 0,88 \text{ в } S], x_2(1)[\text{max} : 1 \text{ в } S], x_3(1)[\text{max} : 0,78 \text{ в } S], \\
 & x_4(1)[\text{max} : 1 \text{ в } S], x_5(1)[\text{max} : 0,52 \text{ в } S], d(1)[\text{max} : 0,95 \text{ в } M_1]\} \Rightarrow \\
 & R^{(1)} : IF(x_1 \text{ это } S \text{ AND } x_2 \text{ это } S \text{ AND } x_3 \text{ это } S \text{ AND} \\
 & \text{ AND } x_4 \text{ это } S \text{ AND } x_5 \text{ это } S) \text{ THEN } d \text{ это } M_1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (x_1(2), x_2(2), x_3(2), x_4(2), x_5(2); d_1(2)) \Rightarrow \\ \Rightarrow & \{x_1(2)[\max : 0,83 \text{ в } D_1], x_2(2)[\max : 0,82 \text{ в } M_1], x_3(2)[\max : 0,77 \text{ в } S], \\ & x_4(2)[\max : 0,77 \text{ в } S], x_5(2)[\max : 0,63 \text{ в } S], d(2)[\max : 0,67 \text{ в } S]\} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$R^{(2)} : IF(x_1 \text{ это } D_1 \text{ AND } x_2 \text{ это } M_1 \text{ AND } x_3 \text{ это } S \text{ AND} \\ \text{AND } x_4 \text{ это } S \text{ AND } x_5 \text{ это } M_1 M_2) \text{ THEN } d \text{ это } S$$

Шаг третий – припишем каждому правилу степень истинности. В наличии имеется большое количество пар обучающих данных, по каждой из них может быть сформулировано одно правило, поэтому существует высокая вероятность того, что некоторые из этих правил окажутся противоречивыми. Это относится к правилам с одной и той же посылкой (условием), но с разными следствиями (выводами). Один из методов решения этой проблемы заключается в приписывании каждому правилу так называемой степени истинности с последующим выбором из противоречащих друг другу правил того, у которого эта степень окажется наибольшей. Таким образом не только разрешается проблема противоречивых правил, но и значительно уменьшается их общее количество. Для правила вида

$$R : IF(x_1 \text{ это } A_1 \text{ AND } x_2 \text{ это } A_2 \text{ AND } x_3 \text{ это } A_3 \text{ AND} \\ \text{AND } x_4 \text{ это } A_4 \text{ AND } x_5 \text{ это } A_5) \text{ THEN } d \text{ это } B \quad (2)$$

степень истинности, обозначаемая как $SP(R)$, определяется как

$$SP(R) = \mu_{A_1}(x_1) \cdot \mu_{A_2}(x_2) \cdot \mu_{A_3}(x_3) \cdot \mu_{A_4}(x_4) \cdot \mu_{A_5}(x_5) \cdot \mu_B(d), \quad (3)$$

где μ_{A_i} – степень принадлежности параметра x_i .

Таким образом, первое правило $R^{(1)}$ имеет степень истинности

$$\begin{aligned} SP(R^{(1)}) &= \mu_S(x_1) \cdot \mu_S(x_2) \cdot \mu_S(x_3) \cdot \mu_S(x_4) \cdot \mu_S(x_5) \cdot \mu_{M_1}(d) = \\ &= 0,88 \times 1 \times 0,78 \times 1 \times 0,52 \times 0,95 = 0,339, \end{aligned}$$

а второе правило –

$$\begin{aligned} SP(R^{(2)}) &= \mu_{D_1}(x_1) \cdot \mu_{M_1}(x_2) \cdot \mu_S(x_3) \cdot \mu_S(x_4) \cdot \mu_{M_1 M_2}(x_5) \cdot \mu_S(d) = \\ &= 0,83 \times 0,82 \times 0,77 \times 0,77 \times 0,63 \times 0,67 = 0,170, \end{aligned}$$

где μ – степень принадлежности параметра x_i к соответствующим областям (M_1, M_2, S, D_1, D_2)

Далее создадим базу нечетких правил. Эта база представляется таблицей, которая заполняется нечеткими правилами с наибольшей степенью истинности.

Следующий шаг – дефаззификация. Определим с помощью базы правил отображения $f : (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \rightarrow \bar{d}$, где \bar{d} – выходная величина нечеткой системы. При определении количественного значения управляющего воздействия \bar{d} для данных входных сигналов $(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ необходимо выполнить операцию дефаззификации. Вначале для входных сигналов $(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ с использованием операции произведения объединим посылки (условия) k -го нечеткого правила. Определяется так называемая степень активности k -го правила. Ее значение рассчитывается по формуле

$$\tau^{(k)} = \mu_{A_1^{(k)}}(x_1) \cdot \mu_{A_2^{(k)}}(x_2) \cdot \mu_{A_3^{(k)}}(x_3) \cdot \mu_{A_4^{(k)}}(x_4) \cdot \mu_{A_5^{(k)}}(x_5). \quad (4)$$

Например, для первого правила $R^{(1)}$ степень активности определяется выражением

$$\tau^{(1)} = \mu_S(x_1) \cdot \mu_S(x_2) \cdot \mu_S(x_3) \cdot \mu_S(x_4) \cdot \mu_S(x_5).$$

Для расчета выходного значения \bar{d} воспользуемся способом дефаззификации по среднему центру:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{k=1}^N \tau^{(k)} \bar{d}^{(k)}}{\sum_{k=1}^N \tau^{(k)}}. \quad (5)$$

Для подготовки программной реализации представлен алгоритм построения базы в виде блок-схемы (рис. 7).

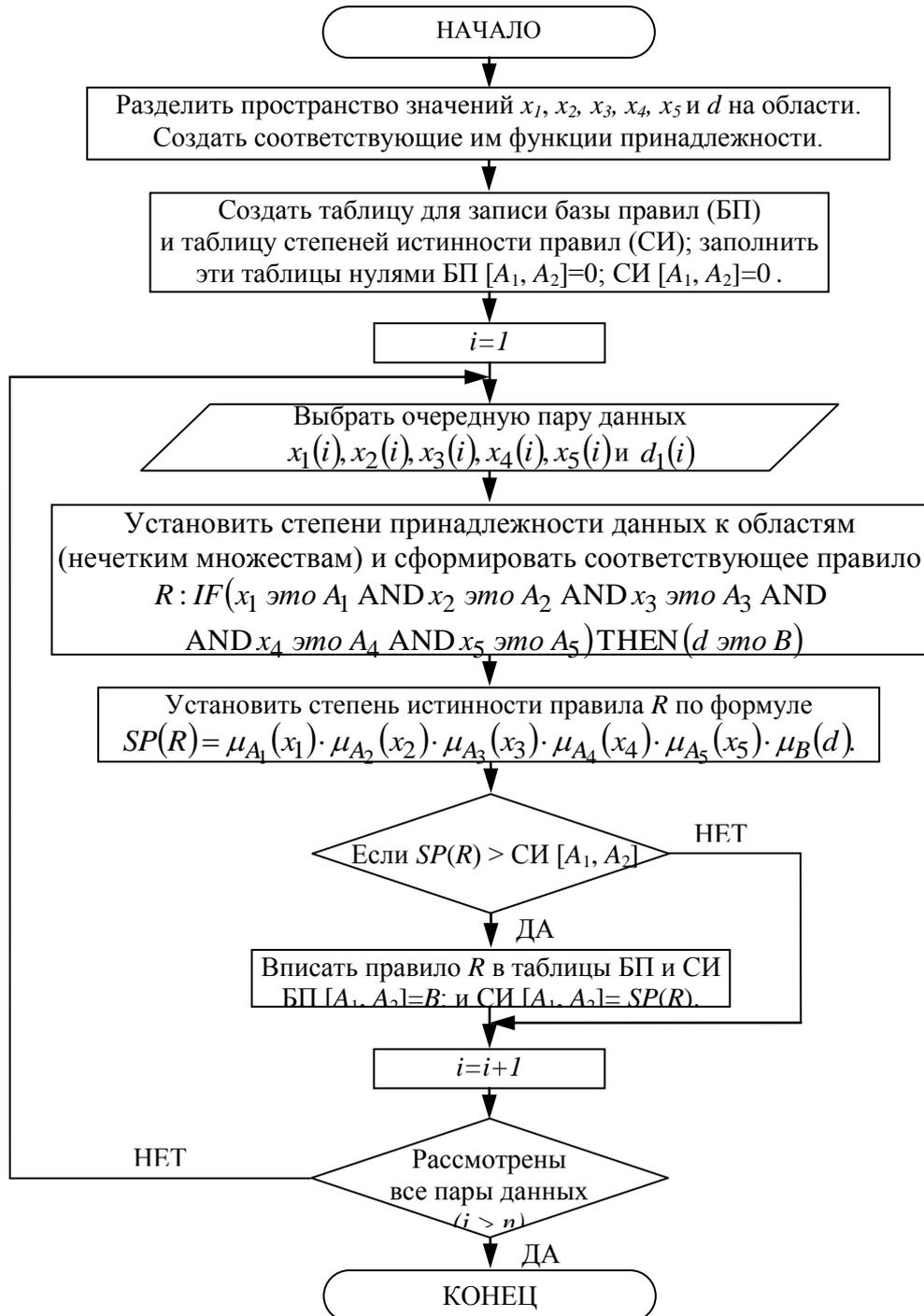


Рисунок 7 – Алгоритм построения базы правил нечеткой нейронной сети прогнозирования результатов МНО

ВЫВОДЫ

В ходе проведенного эксперимента МИО сверл из стали Р6М5 диаметром 4 мм было выявлено, что использование такого простого и очень эффективного алгоритма для формирования базы нечетких правил позволяет создать в интеллектуальной системе базу нечетких правил сети ANFIS, которые в дальнейшем будут использованы для выбора режимов МИО схожих образцов. Результаты эксперимента показали снижение времени на 15-20% и затрат электроэнергии 30-40% на процесс МИО обработки сверла (по сравнению с применением старых систем управления МИО). Использование данных для обучения сети ANFIS, полученных в ходе реального эксперимента, позволяет достигать прогнозируемую стойкость сверла с минимальной ошибкой (средняя ошибка прогнозирования составила 2-3% по результатам моделирования с помощью пакета Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB), что позволит сократить время на вычисление оптимальных параметров обработки и повысит точность выбора этих параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малыгин Б.В., Бень А.П. Магнитное упрочнение изделий. Теория и практика. – Херсон: Издательство Херсонского государственного морского института, 2009. – 352 с.: ил.
2. Иванов В.Ю. Обоснование параметров магнитно-импульсного способа разупрочнения коренных золотосодержащих руд при их рудоподготовке: дис. кандидата технических наук: 25.00.20. – Москва, 2009. – 148 с.
3. Малыгин Б.В. Способ обработки стальных изделий. – А. с. № 1728300. – Бюл. № 28, 1991.
4. Пустовойт В.Н. Алгоритмизация и программа расчета параметров магнитного упрочнения. – Минск: ФТИ АН БССР, 1990. – 115 с.
5. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
6. Построение нечетких правил. Научная библиотека избранных естественнонаучных изданий [Электронный ресурс]. – URL: http://sernam.ru/book_gen.php?id=26 (дата обращения: 15.05.2014).

Врублевский Роман Евгеньевич

Херсонская государственная морская академия, г. Херсон

Аспирант, старший преподаватель кафедры эксплуатации судовых энергетических установок и общинженерной подготовки

E-mail: amor-vr@narod.ru

R.E. VRUBLYOVSKIY (*Post-graduate Student,
Senior Teacher of the Department of Operation of Ship Power Plants and General Engineering Training*)
Kherson State Maritime Academy, Kherson

CONSTRUCTING FUZZY RULE BASE FOR THE IMPLEMENTATION OF ANFIS NETWORK PREDICTION OF MAGNETIC-PULSE TREATMENT RESULT

The article describes a method for constructing fuzzy rule base based on the numerical data for intelligent system controlling mode selection of magnetic-pulse treatment on the basis of ANFIS network. This method will make it possible to decrease the time of constructing the rule base of process controlling module.

Keywords: *fuzzy rules base; intellectual control system; magnetic-pulse treatment.*

BIBLIOGRAPHY (TRANSLITERATED)

1. Maly'gin B.V., Ben' A.P. Magnitnoe uprochnenie izdelij. Teoriya i praktika. – Xerson: Izdatel'stvo Xersonskogo gosudarstvennogo morskogo instituta, 2009. – 352 s.: il.
2. Ivanov V.Yu. Obosnovanie parametrov magnitno-impul'snogo sposoba razuprochneniya korenny'x zolotosoderzhashhix rud pri ix rudopodgotovke: dis. kandidata texnicheskix nauk: 25.00.20. – Moskva, 2009. – 148 s.
3. Maly'gin B.V. Sposob obrabotki stal'ny'x izdelij. – A. s. № 1728300. – Byul. № 28, 1991.
4. Pustovojt V.N. Algoritmizaciya i programma rascheta parametrov magnitnogo uprochneniya. – Minsk: FTI AN BSSR, 1990. – 115 s.
5. Rutkovskaya D., Pilin'skij M., Rutkovskij L. Nejrorny'e seti, geneticheskie algoritmy' i nechyotkie sistemy': per. s pol'sk. I.D. Rudinskogo. – M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2006. – 452 s.
6. Postroenie nechyotkix pravil. Nauchnaya biblioteka izbranny'x estestvennonauchny'x izdaniy [E'lektronny'j resurs]. – URL: http://sernam.ru/book_gen.php?id=26 (data obrashheniya: 15.05.2014).