

**ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ
СИСТЕМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ У СИСТЕМАХ ДІАГНОСТИКИ
СТАНУ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ**

В. О. Залога, *д-р техн. наук, професор;*
Р. М. Зінченко, *канд. техн. наук, доцент,*
Сумський державний університет, м. Суми,
E-mail: rusiklion@gmail.com

У статті розглянуто можливість використання штучних нейронних мереж як експертних підсистем систем діагностики стану різальних інструментів. Досліджено нейронні мережі із одним, двома та трьома схованими шарами для опису залежності зносу різального інструменту від величини діагностичного сигналу.

Ключові слова: *система діагностики, експертна підсистема, штучна нейронна мережа, знос різального інструменту.*

ВСТУП

Аналіз тенденцій розвитку світового машинобудівного та приладобудівного виробництва показує, що його відмінною особливістю є інтенсивний процес підвищення продуктивності, надійності й довговічності функціонування технологічного обладнання, збільшення частки прецизійних верстатів, підвищення рівня автоматизації, структурної та системної інтеграції як технологічних процесів у цілому, так і їх окремих елементів [1-3]. У зв'язку з цим завдання побудови систем автоматичної діагностики та управління процесом різання, що забезпечують необхідну якість, високу продуктивність і мінімальні витрати на обробку деталей машин на металорізальних верстатах, особливо в умовах гнучкого автоматизованого виробництва, була і продовжує залишатися пріоритетною науково-технічною проблемою. Однак створення систем автоматичної діагностики неможливе без використання сучасних інтелектуальних систем. Однією з таких систем є система нечіткої логіки (НЛ).

Уперше термін «нечітка логіка» (fuzzy logic) був уведений американським професором азербайджанського походження Лотфі Заде в 1965 році у праці «Нечіткі множини» в журналі «Інформатика та управління» [4]. Підставою для створення нової теорії послужила суперечка професора зі своїм другом про те, чия з дружин привабливіша. До єдиної думки вони так і не дійшли. Це змусило Заде сформулювати концепцію, яка виражає нечіткі поняття типу «привабливість» у числовій формі.

Нечітка логіка базується на теорії нечітких множин. Для чітких множин результатом обчислення характеристичної функції можуть бути тільки два значення – 0 або 1, а для нечітких множин ця кількість нескінченна, але обмежена діапазоном від нуля до одиниці.

На початку 1920-х років польський математик Лукашевич працював над принципами багатозначної математичної логіки, в якій значеннями предикатів могли бути не тільки «істина» або «брехня». У 1937 р. ще один американський вчений Макс Блек у своїй статті в журналі «Філософія науки» вперше застосував багатозначну логіку Лукашевича до списків як для множин об'єктів і назвав такі множини невизначеними [5]. І лише майже через 30 років після цієї праці Блека, Заде на основі логіки Лукашевича побудував повноцінну алгебраїчну систему. Минуло 10 років і теоретична алгебра Заде завдяки Ібрагіму Мамдані (Ebrahim

Mamdani) з лондонського коледжу королеви Марії (Queen Mary College) працювала. Саме Мамдані в 1975 році спроектував перший функціонуючий на основі алгебри Заде контролер, що керував паровою турбіною.

Перший період (кінець 60-х–початок 70 рр.) характеризується розвитком теоретичного апарату нечітких множин (Л. Заде, Е. Мамдані, Белман). У другому періоді (70 – 80-ті роки) з'являються перші практичні результати в галузі нечіткого управління складними технічними системами (парогенератор з нечітким керуванням). Одночасно стала приділятися увага питанням побудови експертних систем, побудованих на нечіткій логіці, розробленню нечітких контролерів. Нечіткі експертні системи для підтримки прийняття рішень знаходять широке застосування в медицині та економіці. Нарешті, в третьому періоді, який триває з кінця 80-х років і до цього часу, з'являються пакети програм для побудови нечітких експертних систем (у цій роботі проектування нечітких систем відбувається у програмному середовищі Matlab та пакеті розширення FuzzyLogic Toolbox).

Перевагами нечітких систем порівняно з іншими [6–8] є: можливість оперувати нечіткими вхідними даними; можливість нечіткої формалізації критеріїв оцінки і порівняння: оперування критеріями «більшість», «можливо», «переважно» та ін.; можливість проведення якісних оцінок як вхідних даних, так і вихідних результатів; можливість проведення швидкого моделювання складних динамічних систем та їх порівняльний аналіз із заданим ступенем точності: оперуючи принципами поведінки системи, описаними fuzzy-методами, по-перше, не витрачається багато часу на з'ясування точних значень змінних і складання рівнянь, що описують, по-друге, можуть оцінюватися різні варіанти вихідних значень.

Недоліками нечітких систем є [9]: відсутність стандартної методики конструювання нечітких систем; неможливість математичного аналізу нечітких систем існуючими методами; застосування нечіткого підходу порівняно з імовірнісним не приводить до підвищення точності обчислень.

Очевидною сферою впровадження алгоритмів нечіткої логіки є різноманітні експертні системи, у тому числі [9–11]: нелінійний контроль над процесами (виробництво); системи, що самонавчаються (або класифікатори), дослідження ризикових і критичних ситуацій; розпізнавання образів; фінансовий аналіз (ринки цінних паперів); дослідження даних (корпоративні сховища); вдосконалення стратегій керування і координації дій, наприклад складне промислове виробництво.

Найбільш важливим застосуванням теорії нечітких множин є контролери нечіткої логіки. Їх функціонування дещо відрізняється від роботи звичайних контролерів; для опису системи замість диференціальних рівнянь використовуються знання експертів. Ці знання можуть бути виражені за допомогою лінгвістичних змінних, які описані нечіткими множинами [12–16].

Загальна структура **мікроконтролера**, що використовує нечітку логіку, показана рис. 1. Вона містить: блок фазифікації; базу знань; блок рішень; блок дефазифікації. Блок фазифікації перетворює чіткі величини, виміряні на виході об'єкта управління, в нечіткі величини, які описані лінгвістичними змінними в базі знань. Блок рішень використовує нечіткі умовні правила (if – then), закладені в базу знань, для перетворення нечітких вхідних даних у необхідні керуючі впливи, які також носять нечіткий характер. Блок дефазифікації перетворює нечіткі дані з виходу блоку рішень у чітку величину, яка використовується для управління об'єктом.

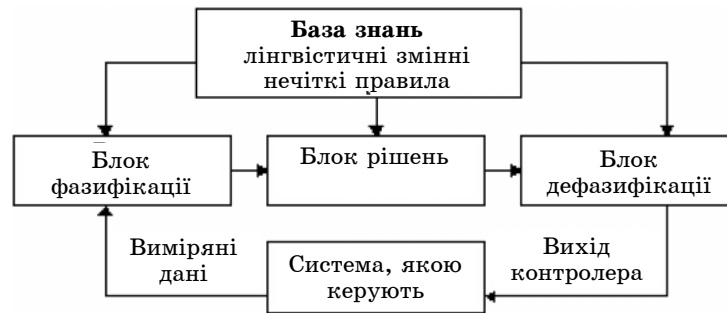


Рисунок 1 – Загальна структура нечіткого мікроконтролера

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Метою цієї роботи є перевірка можливості опису залежності відповідних характеристик діагностичного сигналу від величини зносу різального інструменту нечіткими системами, побудованими за такими типами: за Мамдані та за Сугено.

Завданням запропонованого дослідження було використання НЛ для опису залежності зношування різального інструменту від величини потужності діагностичного сигналу, отриманого для методу діагностики стану різального інструменту за акустичним випромінюванням (рис. 2) [17], та встановлення: яка із функцій приналежності є найбільш ефективною для вирішення вищезазначеного завдання.

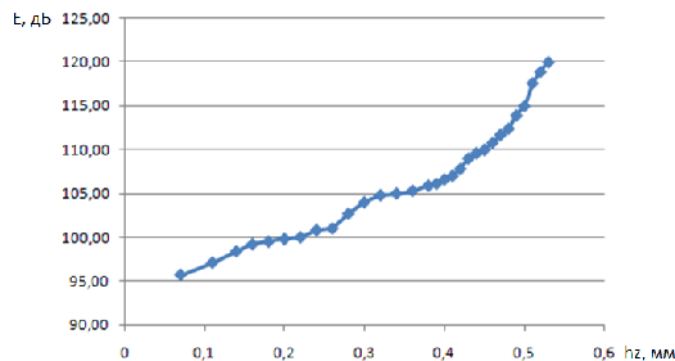


Рисунок 2 – Залежність величини зношування різального інструменту по задній поверхні hz від величини потужності діагностичного сигналу E

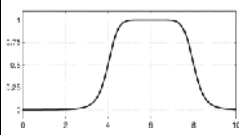
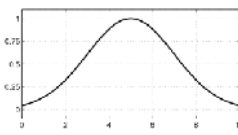
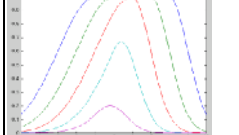
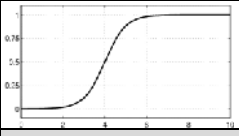
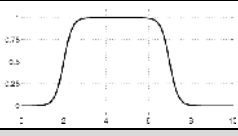
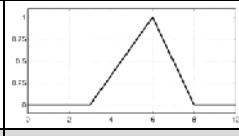
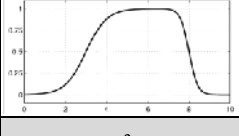
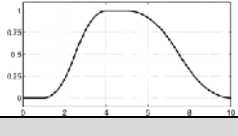
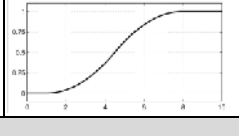

Для проведення експериментів було створено експертну вибірку, яка поділяла залежність (рис. 2) на дев'ять частин, та бралися значення середини цих частин по осі зносу різального інструменту та відповідні їм значення потужності акустичного випромінювання (табл. 1).

Таблиця 1 – Значення експертної вибірки

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E, дб	97,5	99,06	100,63	102,19	103,75	105,31	106,88	108,44	110
hz, мм	0,04	0,21	0,271	0,303	0,328	0,353	0,375	0,406	0,47

Далі проводили побудову системи НЛ у системі Matlab (пакет розширення FuzzyLogic Toolbox) [18–20] із різними функціями приналежності (див. табл. 2) та оцінювали точність кожної із систем, побудованих спочатку за Мамдані, а потім за Сугено.

Таблиця 2 – Функції приналежності

Функція приналежності	gbellmf	gaussmf	gauss2mf
Вигляд функції приналежності			
Функція приналежності	sigmf	dsigmf	trimf
Вигляд функції приналежності			
Функція приналежності	psigmf	pimf	smf
Вигляд функції приналежності			
Функція приналежності	zmf		
Вигляд функції приналежності			

Результати використання систем НЛ за Мамдані

База знань Мамдані може трактуватися як розбивка простору факторів, що впливають на підобласті з розмитими межами, всередині яких функція відгуку набуває нечіткого значення. Правило в базі знань є «інформаційним згустком», що відображає одну з особливостей залежності «входи – вихід». Такі «згустки насиченою інформацією» можуть розглядатися як аналог вербального кодування, яке, як встановили психологи, відбувається в мозку людини під час навчання. Можливо тому формування нечіткої бази знань типу Мамдані зазвичай не викликає труднощів у експерта.

Нижче у табл. 3 та на рис. 3–12 представлено результати роботи системи НЛ, побудованої за Мамдані.

Таблиця 3 – Точність системи за нечітким висновком за Мамдані

Функція приналежності	gbellmf		gaussmf		gauss2mf			
	В.	П., %	В.	П., %	В.	П., %		
1	97,5	0,04	0,05	25	0,07	75	0,04	0
2	99,06	0,21	0,21	0	0,2	4,8	0,13	38
3	100,63	0,271	0,269	6,3	0,27	3,7	0,195	28
4	102,19	0,303	0,302	1,6	0,302	0,3	0,242	20
5	103,75	0,328	0,328	0	0,328	0	0,285	13
6	105,31	0,353	0,352	0,1	0,353	0	0,329	6,8
7	106,88	0,375	0,375	0	0,376	0,3	0,372	0,8
8	108,44	0,406	0,405	0,2	0,405	0,2	0,419	3,2
9	110	0,47	0,46	2	0,46	21,3	0,47	0

Продовження табл. 3

Функція приналежності			psigmf		pimf		trimf	
	Е, дБ	hz, мм	В.	П., %	В.	П., %	В.	П., %
1	97,5	0,04	0,07	75	0,01	75	0,1	14,7
2	99,06	0,21	0,13	38,1	0,09	57,1	0,162	23
3	100,63	0,271	0,185	31,7	0,151	44,3	0,212	22
4	102,19	0,303	0,231	23,8	0,204	32,7	0,257	15,15
5	103,75	0,328	0,275	16,2	0,256	21,9	0,302	7,8
6	105,31	0,353	0,319	9,6	0,308	12,7	0,347	1,8
7	106,88	0,375	0,362	3,5	0,359	4,3	0,437	16,6
8	108,44	0,406	0,420	3,4	0,411	1,2	0,47	15,7
9	110	0,47	0,46	2,1	0,47	0	0,48	2,3
Функція приналежності			sigmf		dsigmf		smf	
	Е, дБ	hz, мм	В.	П., %	В.	П., %	В.	П., %
1	0,26	0,07	0,26	558	0,07	75	0,25	36,8
2	0,271	0,13	0,271	29	0,13	38,1	0,253	20,3
3	0,271	0,185	0,271	0	0,185	31,7	0,253	6,75
4	0,271	0,231	0,271	10,5	0,231	23,8	0,253	16,6
5	0,271	0,275	0,271	17,4	0,275	16,2	0,253	23
6	0,271	0,319	0,271	23,2	0,319	9,6	0,253	28,4
7	0,271	0,358	0,271	27,7	0,358	4,5	0,253	32,6
8	0,271	0,424	0,271	33,2	0,424	4,4	0,253	37,8
9	0,271	0,46	0,271	42,3	0,46	2,1	0,253	46
Функція приналежності			zmf					
	Е, дБ	hz, мм	В.			П., %		
1	97,5	0,04	0,24			506		
2	99,06	0,21	0,242			15,5		
3	100,63	0,271	0,242			10,5		
4	102,19	0,303	0,242			20		
5	103,75	0,328	0,242			26		
6	105,31	0,353	0,242			31,3		
7	106,88	0,375	0,242			35,3		
8	108,44	0,406	0,242			40,3		
9	110	0,47	0,242			48		

де: В.- результат обчислення системою НЛ; П.-помилка

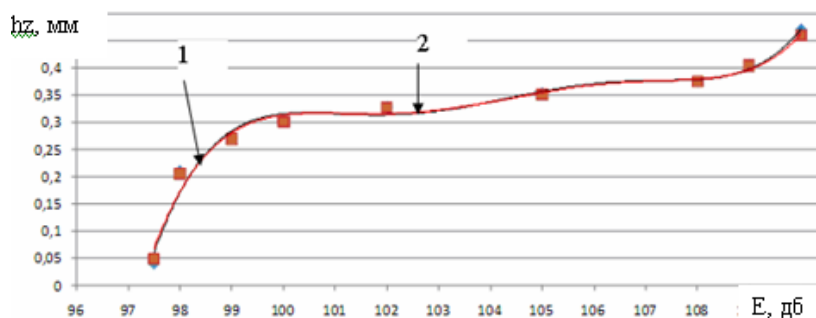


Рисунок 3 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність; 2 – результат роботи системи НЛ за Мамдані (функція приналежності – *gbellmf*)

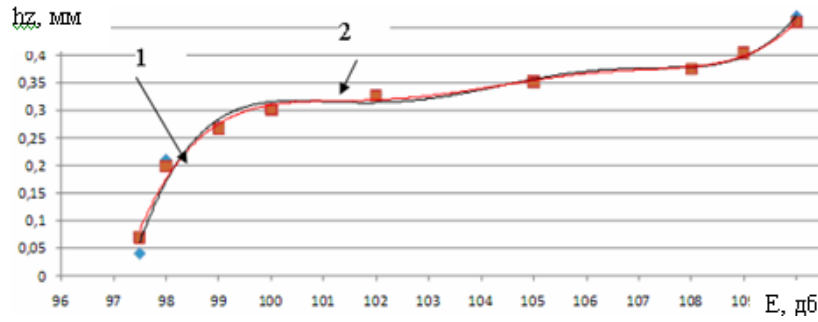


Рисунок 4 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність;
2 – результат роботи системи НЛ за Мамдані
(функція приналежності - gaussmf)

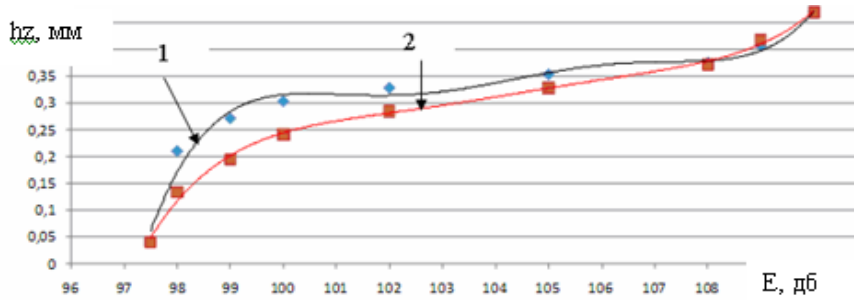


Рисунок 5 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність;
2 – результат роботи системи НЛ за Мамдані
(функція приналежності - gauss2mf)

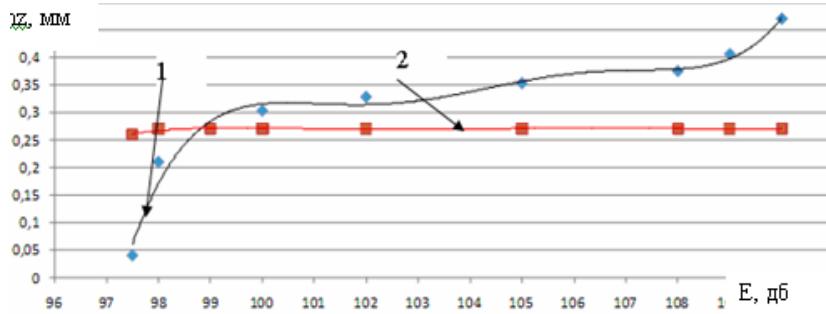


Рисунок 6 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність;
2 – результат роботи системи НЛ за Мамдані
(функція приналежності - sigmf)

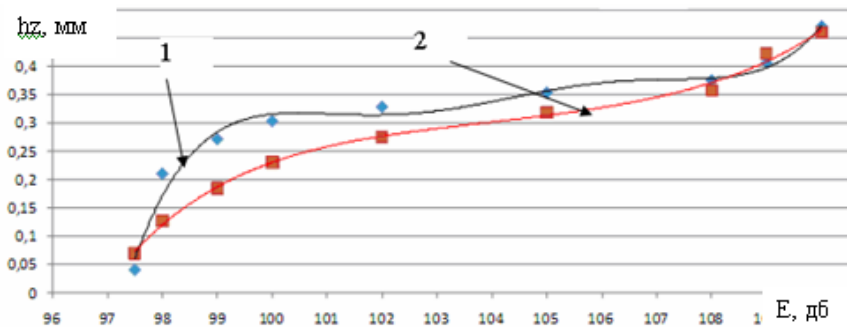


Рисунок 7 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність;
2 – результат роботи системи НЛ за Мамдані
(функція приналежності - dsigmf)

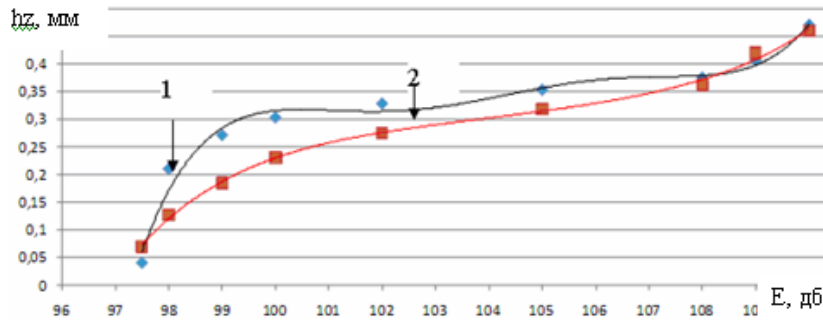


Рисунок 8 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність; 2 – результат роботи системи НЛ за Мамдані (функція приналежності – $psigmf$)

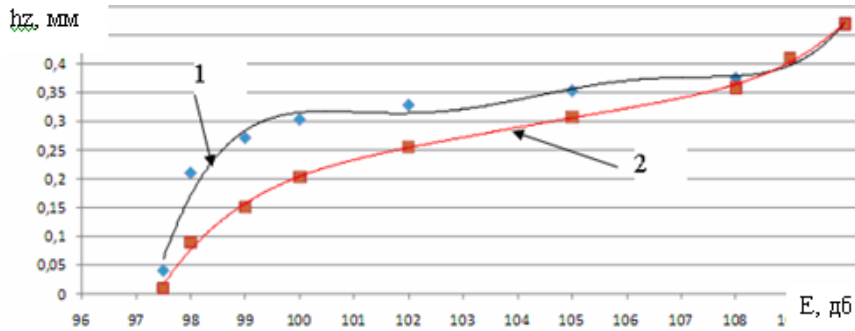


Рисунок 9 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність; 2 – результат роботи системи НЛ за Мамдані (функція приналежності – $pimf$)

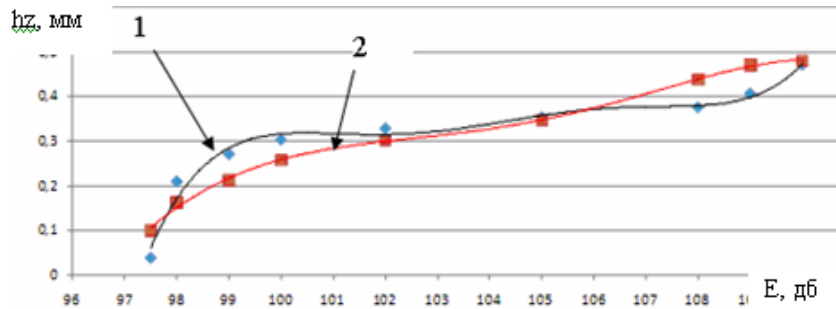


Рисунок 10 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність; 2 – результат роботи системи НЛ за Мамдані (функція приналежності – $trimf$)

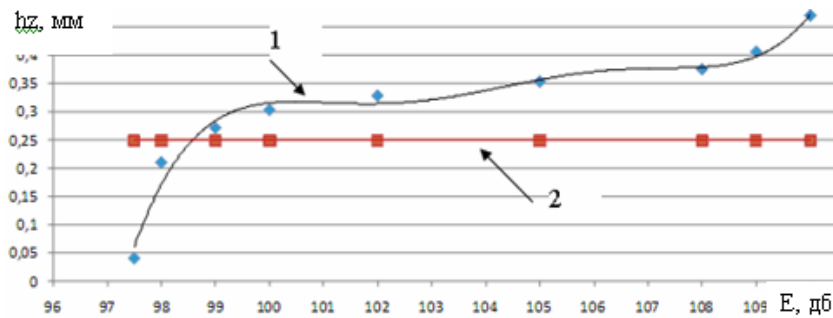


Рисунок 11 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність; 2 – результат роботи системи НЛ за Мамдані (функція приналежності – smf)

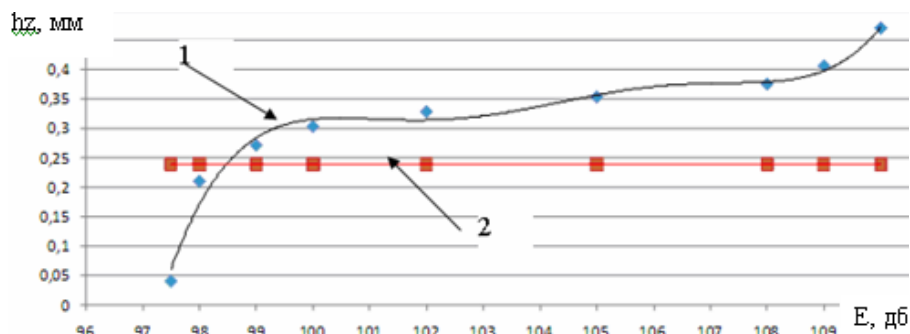


Рисунок 12 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність; 2 – результат роботи системи НЛ за Мамдані (функція приналежності – *zmf*)

Результати використання систем НЛ за Сугено

База знань Сугено аналогічна базі знань Мамдані за винятком висновків правил, які задаються не нечіткими термами, а лінійною функцією від входів. Правила в базі знань Сугено є свого роду перемикачами з одного лінійного закону «входи - вихід» на інший, теж лінійний. Межі підобластей розмиті, отже, одночасно можуть виконуватися декілька лінійних законів, але з різними ступенями. У базі знань Сугено немає вагових коефіцієнтів, так як вони були б лінійно залежні з висновками правил.

Нижче у таблиці 4 та на рисунках 13-22 представлено результати роботи системи НЛ побудованої за Мамдані.

Таблиця 4 – Точність системи за нечітким висновком за Сугено

Функція приналежності		gbellmf		gaussmf		gauss2mf	
Е, дб	hz,мм	В.	П., %	В.	П., %	В.	П., %
1	97,5	0,04	0	0.05	25	0.04	0
2	99,06	0,21	0	0.2	4.8	0.21	0
3	100,63	0,271	0.3	0.27	3.7	0.271	0
4	102,19	0,303	0	0.303	0	0.303	0
5	103,75	0,328	0	0.328	0	0.328	0
6	105,31	0,353	0	0.352	0.3	0.353	0
7	106,88	0,375	0	0.376	0.3	0.376	0.3
8	108,44	0,406	0.2	0.408	0.5	0.408	0.5
9	110	0,47	0	0.47	0	0.47	0
Функція приналежності		psigmf		pimf		Trimf	
Е, дб	hz,мм	В.	П., %	В.	П., %	В.	П., %
1	97,5	0,04	0	0.04	0	0.04	0
2	99,06	0,21	0	0.21	0	0.21	0
3	100,63	0,271	9.5	0.271	0	0.271	0
4	102,19	0,303	5.5	0.303	0	0.303	0
5	103,75	0,328	1	0.328	0	0.327	0.2
6	105,31	0,353	0.9	0.353	0	0.353	0
7	106,88	0,375	0.6	0.375	0	0.375	0
8	108,44	0,406	0.5	0.406	0	0.405	0.2
9	110	0,47	0.7	0.47	0	0.47	0

Продовження табл. 4

Функція приналежності			sigmf		dsigmoid	
	Е, дБ	hz, мм	В.	П., %	В.	П., %
1	97,5	0,04	0.04	0	0.04	0
2	99,06	0,21	0.097	53.8	0.19	9.5
3	100,63	0,271	0.156	42.4	0.265	5.5
4	102,19	0,303	0.192	36.6	0.300	1
5	103,75	0,328	0.218	33.5	0.325	0.9
6	105,31	0,353	0.242	31.4	0.351	0.6
7	106,88	0,375	0.260	30.7	0.373	0.5
8	108,44	0,406	0.278	31.5	0.403	0.7
9	110	0,47	0.30	36.2	0.46	2.1
Функція приналежності			Smf		zmf	
	Е, дБ	hz, мм	В.	П., %	В.	П., %
1	97,5	0,04	0.04	0	0.31	665
2	99,06	0,21	0.12	40.5	0.34	61.7
3	100,63	0,271	0.174	36	0.358	32
4	102,19	0,303	0.206	32	0.372	23
5	103,75	0,328	0.230	30	0.386	17.8
6	105,31	0,353	0.251	29	0.401	13.6
7	106,88	0,375	0.268	28.4	0.417	11.2
8	108,44	0,406	0.286	30	0.438	7.9
9	110	0,47	0.3	37	0.47	0

де: В.- результат обчислення системою НЛ; П.-помилка

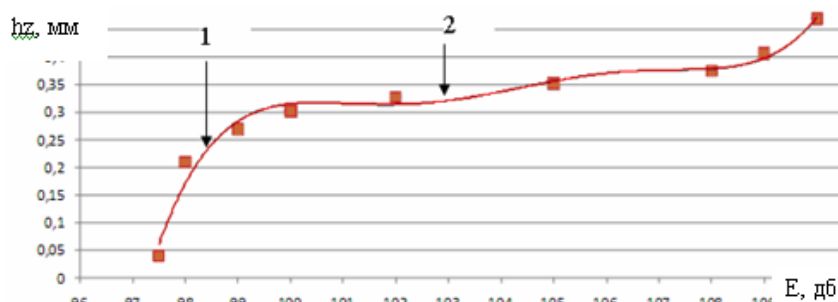


Рисунок 13 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність; 2 – результат роботи системи НЛ за Сугено (функція приналежності – gbellmf)

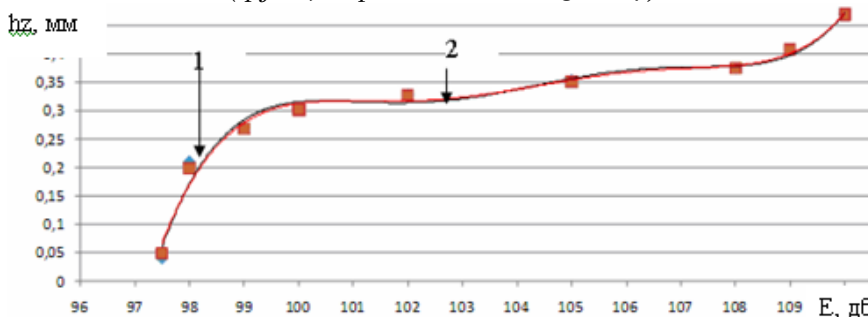


Рисунок 14 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність; 2 – результат роботи системи НЛ за Сугено (функція приналежності – gaussmf)

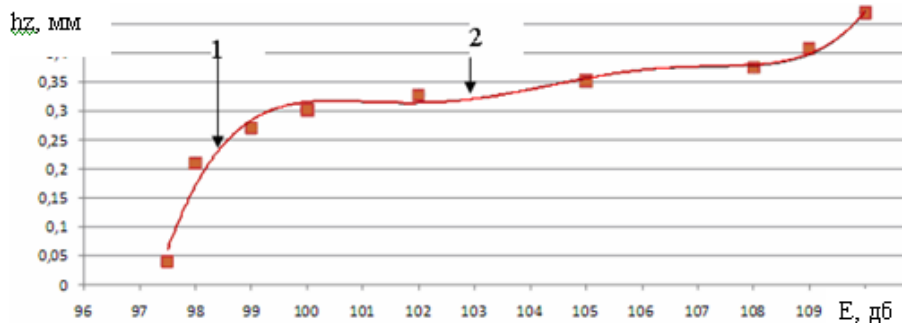


Рисунок 15 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність;
2 – результат роботи системи НЛ за Сугено (функція приналежності – gauss2mf)

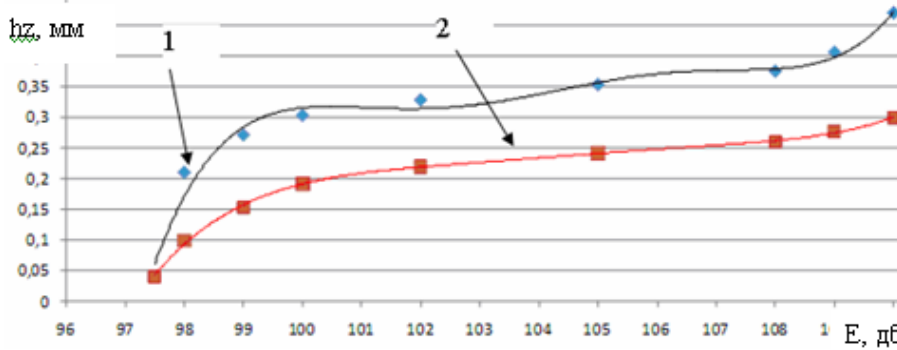


Рисунок 16 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність;
2 – результат роботи системи НЛ за Сугено (функція приналежності – sigmf)

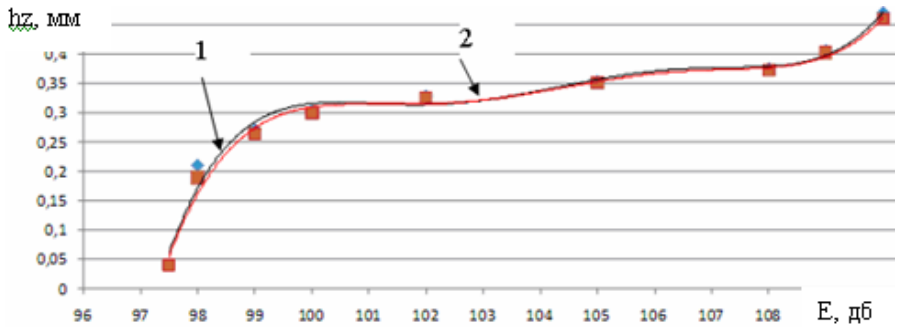


Рисунок 17 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність;
2 – результат роботи системи НЛ за Сугено (функція приналежності – dsigmf)

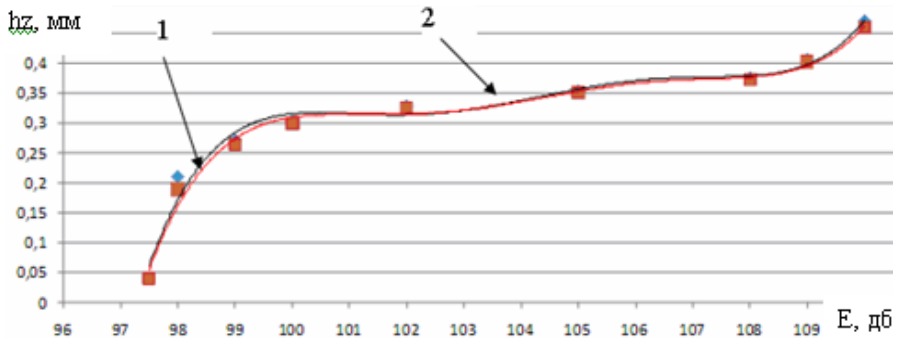


Рисунок 18 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність;
2 – результат роботи системи НЛ за Сугено (функція приналежності – psigmf)

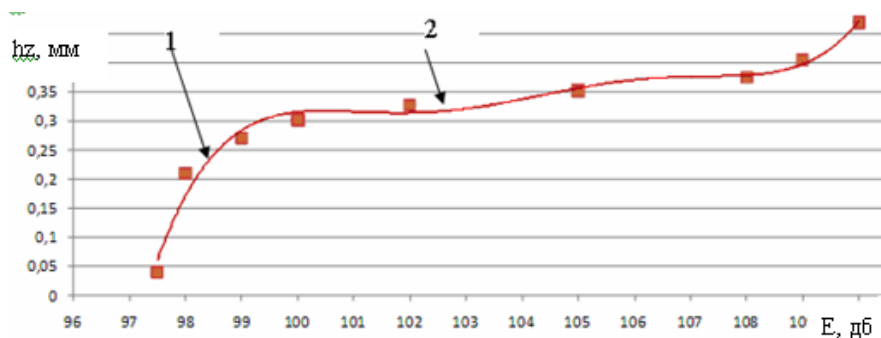


Рисунок 19 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність; 2 – результат роботи системи НЛ за Сугено (функція приналежності – *ritf*)

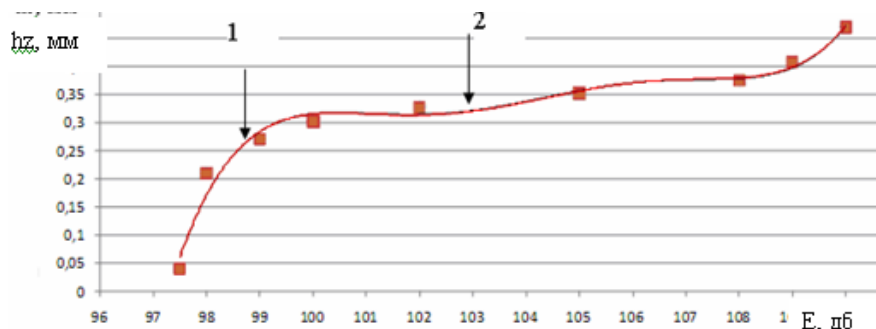


Рисунок 20 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність; 2 – результат роботи системи НЛ за Сугено (функція приналежності – *trimf*)

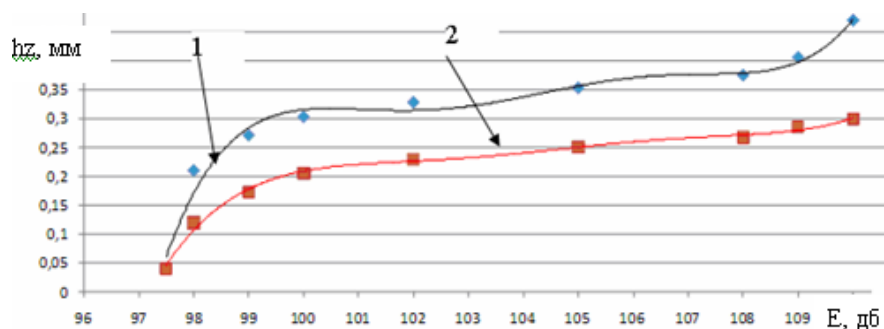


Рисунок 21 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність; 2 – результат роботи системи НЛ за Сугено (функція приналежності – *stmf*)

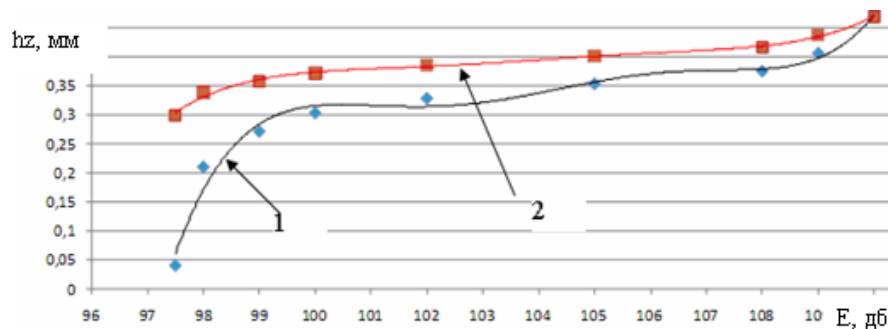


Рисунок 22 – Перевірка працездатності системи НЛ: 1 – задана залежність; 2 – результат роботи системи НЛ за Сугено (функція приналежності – *zmf*)

ВИСНОВКИ

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы: системы НЛ, построенные по Мамдани описывают заданную зависимость (зависимость значения сигнала мощности акустического виброизлучения от износа инструмента (рис.2) с значительно меньшей точностью, чем системы НЛ, построенные по Сугено, поэтому, на наш взгляд, они являются преимущественными для использования их в качестве экспертных подсистем систем диагностики состояния режущих инструментов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ В СИСТЕМАХ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

В. А. Залого, Р. М. Зинченко,

Сумский государственный университет, г. Сумы

В статье рассмотрена возможность использования искусственных нейронных сетей в качестве экспертной подсистемы систем диагностики состояния режущих инструментов. Были рассмотрены нейронные сети с одним, двумя и тремя скрытыми слоями для описания зависимости износа режущего инструмента от величины диагностического сигнала.

Ключевые слова: система диагностики, экспертная подсистема, искусственная нейронная сеть, износ режущего инструмента.

STUDY OF POTENTIAL USE OF AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK IN CUTTING TOOLS DIAGNOSTICS SYSTEM

V. O. Zaloha, R. M. Zinchenko

Sumy State University, Sumy

The article describes the use of artificial neural networks as expert subsystems of cutting tools diagnostics systems. Examined the neural network with one, two and three hidden layers to describe the dependence of the cutting tool wear on the value of the diagnostic signal.

Key words: diagnostic system, expert subsystems, artificial neural network, cutting tool wear.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Хвостиков А. С. Диагностика износа режущего инструмента на основе вейвлет-анализа сигнала виброакустической эмиссии: дис. ... кандидата технических наук : 05.03.01 / Хвостиков Александр Станиславович; [Место защиты: Комсомольск-на-Амуре гос. техн. ун-т]. – Комсомольск-на-Амуре, 2007. – 157 с.: ил. РГБ ОД, 61 07-5/4967
2. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский – М., 2004.
3. Деревянченко, А. Г. Распознавание состояний режущих инструментов интегрированных производств. [текст] / А. Г. Деревянченко, В. Д. Павленко // Шумный интеллект. – 2006. - № 4. – С. 735 -742.
4. Заде Л. А. Роль мягких вычислений и нечеткой логики в понимании, конструировании и развитии информационных интеллектуальных систем. [Текст] / Л. А. Заде // Новости Искусственного Интеллекта. – 2001. - № 2-3. - С. 7 -11.
5. Black Max (1937). Vagueness: An exercise in logical analysis// Philosophy of Science 4: 427-455. Reprinted in R. Keefe, P. Smith (eds.): Vagueness: A Reader, MIT Press 1997
6. Организация интеллектуальных вычислений [Электронный ресурс] // Курс лекций – 2011. – Режим доступа: http://www.victoria.lviv.ua/html/oio/index_rus.html
7. Tikk D. A survey on the universal approximation and its limits in soft computing techniques [Text] / D. Tikk, L. T. Koczy, T. D. Gedeon. – 2003.
8. Dadone P. Design Optimization of Fuzzy Logic Systems // Doctor of Philosophy in Electrical Engineering. - Blacksburg, Virginia, May 2001.
9. Костыркин И. В. Нечеткая логика: достоинства и недостатки / И. В. Костыркин // Информационные технологии в образовании: материалы II Международной научно-практической конференции «Информационные технологии в образовании (ИТО-Черноземье – 2008)». - Курск: Изд-во КГУ, 2008. – 184 с.
10. Самоучитель по экспертным системам [Электронный ресурс] // Самоучитель – 2006. – Режим доступа: <http://sapr.mgsu.ru/biblio/ex-syst/index.html>
11. Паклин Н. Нечеткая логика – математические основы [Электронный ресурс] / Николай Паклин // Сборник статей – 2006. – Режим доступа: <http://d.17-71.com/2006/10/26/fuzzybigins/>

12. Gorse D. The New ERA in Supervised Learning / D. Gorse, A. J. Shepherd, J. G. Taylor // Neural Networks. – March 1997. –Vol. 10, Issue 2.
13. Arabshahi P. Adaptation of Fuzzy Inferencing: A Survey / P. Arabshahi, R. J. Marks, R. Reed // Department of Electrical Engineering, University of Washington FT-10 Seattle, WA 98195 USA.
14. Marin-Blazquez J. G. An Overview of Recent Approaches for Fuzzy Learning / J. G. Marin-Blazquez, A. Chouchoulas, Q. Shen // University of Edinburgh, UK, 2002.
15. Mitra S. Neuro-Fuzzy Rule Generation: Survey in Soft Computing Framework, IEEE Transactions On Neural Networks / S. Mitra, Y. Hayashi – 2000.
16. Leski J. M. -Insensitive Learning Techniques for Approximate Reasoning Systems // International Journal of Computational Cognition - March 2003. - Vol.1, № 1. - P. 21–77.
17. Зинченко Р. Н. Повышение эффективности точения за счет диагностики износа инструмента по акустическому излучению: дисс. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Харьков, 2005. - 188 с.
18. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007.
19. Леоленков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. / А. В. Леоленков. – 2003.
20. Моделирование нечетких систем средствами нечеткой логики в MatLab [Электронный ресурс] // Интернет-учебник – 2010. – Режим доступа: http://www.life-prog.ru/view_zam.php?id=90&cat=5&page=4

Надійшла до редакції 18 квітня 2012 р.