

УДК 620.179.16

С.А. Бабичев, И.Ф. Погребняк, А.В. Шарко

**КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
СЕТИ БАЙЕСА И СИСТЕМЫ НЕЧЕТКОГО
ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА В МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОВ**

Разработана модель нечеткой системы определения прочностных характеристик металлов при использовании методов неразрушающего контроля, основанная на комплексном использовании сети Байеса и системы нечеткого логического вывода. Представлена база знаний, на основании которой произведена настройка нечеткой системы определения прочностных характеристик металлов.

Актуальность темы определяется необходимостью разработки мероприятий по повышению точности определения прочностных характеристик металлов в процессе их изготовления и эксплуатации методами неразрушающих испытаний. На точность измерений при использовании того или иного метода оказывают влияние различные размерные и технологические факторы. С ростом быстродействия компьютеров и созданием новых современных компьютерных технологий обработки информации появляется возможность создания системы обработки информации, учитывающей степень влияния того или иного фактора на точность измерения физических характеристик, обработка данных в которой осуществляется в режиме реального времени.

Анализ публикаций по обозначенной проблеме [1-5] показывает, что, несмотря на очевидные успехи, достигнутые в данной предметной области, проблема комплексного использования различных методов в системе технической диагностики прочностных характеристик металлов в настоящее время не имеет однозначного решения, поскольку остаётся открытым вопрос оценки коэффициентов значимости отдельных методов в системах технической диагностики прочностных характеристик металлов, поэтому тема статьи является актуальной.

© Бабичев С.А., Погребняк И.Ф., Шарко А.В., 2012

Целью статьи является разработка модели определения прочностных характеристик металлов при комплексном использовании акустического, электромагнитного и безобразцового методов неразрушающего контроля, обработка информации в которой осуществляется при помощи байесовской сети и системы нечеткого логического вывода.

Изложение основного материала. На точность определения прочностных характеристик оказывают влияние различные факторы, определяющие погрешность измерения.

Степень влияния факторов различна. Предлагается комплексный учет их влияния, в основу которого положена следующая последовательность мероприятий:

- оценка степени влияния факторов на точность определения выбранным методом неразрушающего контроля при помощи сети Байеса;

- определение коэффициента значимости того или иного фактора;

- определение коэффициентов значимости используемых методов неразрушающего контроля в системе технической диагностики;

- построение нечеткой системы, в которой входными параметрами являются физические характеристики методов неразрушающего контроля, а выходным параметром – прочностные свойства металла.

Теория построения сетей Байеса основывается на предположении, что события являются исчерпывающими и не пересекаются. В этом случае вероятность события E можно вычислить при помощи условных вероятностей:

$$p(E) = \sum_{i=1}^n p(E \cap H_i) = \sum_{i=1}^n p(E | H_i) \cdot p(H_i). \quad (1)$$

Вероятность пересечения событий E и H можно выразить следующим образом:

$$p(E \cap H_k) = p(E | H_k) \cdot p(H_k) = p(H_k | E) \cdot p(E), \quad (2)$$

откуда получаем:

$$p(H_k | E) = \frac{p(E | H_k) \cdot p(H_k)}{p(E)}. \quad (3)$$

С учетом (1) формулу (3) можно представить так:

$$p(H_k | E) = \frac{p(E | H_k) \cdot p(H_k)}{\sum_{i=1}^n p(E | H_i) \cdot p(H_i)}. \quad (4)$$

Для нахождения коэффициентов, определяющих значимость факторов рассчитывались вероятности входных факторов при априори заданной вероятности выходной переменной, и определялся коэффициент максимального изменения вероятностей i -го параметра:

$$k_i = \frac{P_{i \max} - P_{i \min}}{\sum P}, \quad (5)$$

где $\sum P$ - сумма значений вероятностей значений i -го фактора при различных априори заданных значениях выходной переменной.

При помощи данного коэффициента осуществлялась подстройка области определения функций принадлежности нечетких множеств в системе нечеткого логического вывода.

Системы нечеткого логического вывода преобразуют значения входных переменных процесса управления в выходные переменные на основе использования нечетких правил.

Для формирования базы правил необходимо:

– определить множество входных переменных: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$;

– определить множество выходных переменных:

$D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$;

– сформировать базовое терм-множество с соответствующими функциями принадлежности каждого терма: $A = \{a_1, a_2, \dots, a_i\}$;

– сформировать конечное множество нечетких правил, согласованных относительно используемых в них переменных:

$$\bigcup_{k=1}^m \left[\bigcap_{i=1}^n (x_i = a_i^k), \text{ при } \omega_k \right] \rightarrow D = d_k, \quad (6)$$

где $k = \overline{1, m}$ – количество логических высказываний, $i = \overline{1, n}$ – число используемых термов.

Функция принадлежности может иметь различную интерпретацию, в том числе, на основе вероятности, где множество Q описывается интервалом (γ_1, γ_2) : если объект $x > \gamma_1$ и $x < \gamma_2$, то $x \in Q$. Если γ_1 и γ_2 - случайные величины, то Q является нечетким множеством, т.к. имеются объекты, относительно которых нельзя однозначно утверждать, принадлежат ли они множеству Q . При

вероятностной интерпретации функции принадлежности $\mu_{\hat{Q}}(x) = P(x \in Q)$. С учетом введенных обозначений $\mu_{\hat{Q}}(x) = P(\gamma_1 < x < \gamma_2)$. При независимости случайных величин γ_1 и γ_2 имеем $\mu_{\hat{Q}}(x) = P(x > \gamma_1)P(x < \gamma_2)$. Пусть $f_1(\gamma_1)$ и $f_2(\gamma_2)$ - функции плотности вероятности для нижнего и верхнего порогов величин γ_1 и γ_2 соответственно. Обозначив $\int_{-\infty}^x f_1(\gamma) d\gamma$ через $F_1(x)$, а $\int_{-\infty}^x f_2(\gamma) d\gamma$ через $F_2(x)$, где $F_1(x) = P(\gamma_1 < x)$, имеем $\mu_{\hat{Q}}(x) = F_1(x)[1 - F_2(x)]$. Таким образом, определять функцию принадлежности можно не только с помощью процедур непосредственного опроса экспертов, но и на основе функции распределения $F_1(x)$ и $F_2(x)$ (рис. 1).

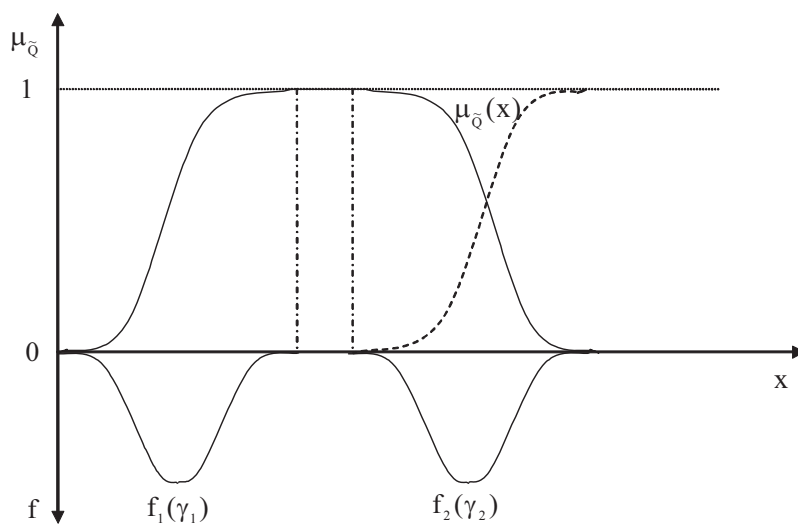


Рис.1. Процедура построения функции принадлежности путем представления от плотности вероятности

В процессе проведения исследований использовались акустический метод, основанный на анализе скорости ультразвука, электромагнитный, основанный на анализе коэрцитивной силы и безобразцовый, основанный на установлении корреляционной зависимости между отпечатком индентора (пирамиды Виккерса, Роквелла, Бринеля) и прочностными свойствами. Рассмотрены следующие факторы:

- S – аппаратная погрешность;
- КР – конфигурация поверхности;
- Q – добротность колебательной системы;
- HS – химический состав контролируемого изделия;
- Тз – температура закалки;

– T_0 – температура отпуска.

– PM – погрешность метода.

Аппаратурная погрешность определялась по независимым измерениям на одном и том же образце. Расчеты показали, что относительное изменение скорости ультразвука составило

$$\frac{\Delta C}{C} = 0,09\%, \quad \text{относительное изменение коэрцитивной силы}$$

$$\frac{\Delta Hc}{Hc} = 0,18\%, \quad \text{относительное изменение твердости} \quad \frac{\Delta HB}{HB} = 0,45\%.$$

На начальном этапе установлен диапазон изменения того или иного параметра, дана оценка чувствительности метода к исследуемому фактору, после чего заданный диапазон был разбит на соответствующие поддиапазоны

Аналогичным образом производилась дискретизация диапазонов изменений качества обработки поверхности контроля KP , добротности Q , химического состава HS , температуры закалки T_3 , температуры отпуска T_0 и погрешности метода PM , связанные с необходимостью проведения большого количества измерений с целью минимизации влияния структуры на точность измерений.

Для построения структуры связей байесовской сети был построен граф взаимного влияния размерных и технологических факторов и измеряемых физических характеристик (рис. 2).

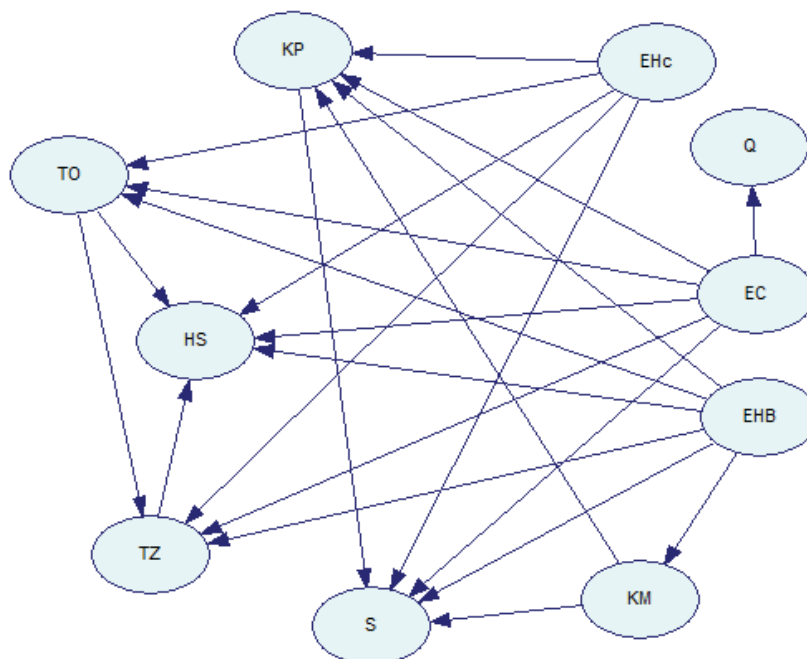


Рис. 2. Структура связей сети Байеса

Распределение вероятностей сопутствующих факторов при крайних значениях изменения скорости ультразвука (ЕС), коэрцитивной силы (ЕНс) и твердости (ЕНВ) представлено в таблицах 1,2 и 3.

Таблица 1

Распределения вероятностей влияния сопутствующих факторов на относительное изменение скорости ультразвука

	ЕС = 0% - 0,30%						ЕС = 1,21% - 1,50%					
	S	Q	КР	НС	ТЗ	ТО	S	Q	КР	НС	ТЗ	ТО
N	10	1	18	88	87	88	1	98	98	67	1	1
S	17	1	18	10	10	9	1	1	1	23	1	2
V	73	98	64	2	3	3	99	1	1	10	98	97

Таблица 2

Распределения вероятностей влияния сопутствующих факторов на относительное изменение коэрцитивной силы

	ЕНс = 0% - 0,50%					ЕНс = 3,00% - 3,50%				
	S	КР	НС	ТЗ	ТО	S	КР	НС	ТЗ	ТО
N	15	32	98	74	77	6	47	1	29	23
S	24	12	1	4	6	10	15	1	7	8
V	61	56	1	22	17	84	38	98	64	69

Таблица 3

Распределения вероятностей влияния сопутствующих факторов на относительное изменение твердости

	ЕНВ = 0% - 0,8%						ЕНВ = 4% - 4,6%					
	S	КР	НС	ТЗ	ТО	КМ	S	КР	НС	ТЗ	ТО	КМ
N	7	1	67	97	96	8	28	96	33	1	1	92
S	12	2	12	1	2	4	33	2	13	1	2	3
V	81	97	21	2	2	88	39	2	54	98	97	5

Среднее значение коэффициентов максимального изменения вероятности влияния соответствующего параметра на измеряемую физическую характеристику рассчитывалось по формуле (5).

Среднее значение коэффициентов, определяющих чувствительность используемого метода к варьированию влияющих факторов следующее:

- для акустического метода $k_1 = 0,65$.
- для электромагнитного метода $k_2 = 0,45$.
- для безобразцового метода $k_3 = 0,73$.

Полученные коэффициенты использованы в качестве подстроечных в системе нечеткого логического вывода при определении прочностных характеристик металла.

Построение нечеткой модели оценивания прочностных характеристик металла осуществлялось при помощи пакета Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB. В процессе настройки системы использовались для входных параметров гауссовы функции принадлежности нечетких множеств.

Для выходных параметров использовались треугольные функции принадлежности нечетких множеств.

Для перехода от нечеткой базы знаний к системе нечетких логических уравнений введём следующие обозначения: $\mu^{a_i^k}(x_i)$ – функция принадлежности переменной x_i к лингвистическому терму a_i^k , где $i = 1, \dots, n$ – количество используемых термов, $k = 1, \dots, m$ – количество используемых правил; $\mu^{d_k}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – функция принадлежности вектора параметров (x_1, x_2, \dots, x_n) к выходной переменной d_k . Формализация входных параметров и выходной характеристики в лингвистические переменные представлена в таблице 4.

Таблица 4.

Формализация входных параметров и выходной характеристики в лингвистические переменные

Входные параметры и выходная характеристика	Границы изменения	Термы лингвистической оценки
$\Delta C / C, \%$	0-2	0-0,5 – «Н»(низкий), 0,6-1,4 – «С»(средний), 1,5-2 – «В»(высокий)
$\Delta H_c / H_c, \%$	0-4	0-1,2 – «Н»(низкий), 1,3-2,7 – «С»(средний), 2,8-4 – «В»(высокий)
$\Delta H_B / H_B, \%$	0-5	0-1,5 – «Н»(низкий), 1,6-3,4 – «С»(средний), 3,5-5 – «В»(высокий)
$\sigma_B, \text{МПа}$	900-1650	900-1050 – «ОН»(очень низкий), 1051-1200 – «Н»(низкий), 1201-1350 – «С»(средний), 1351-1500 – «В»(высокий), 1501-1650 – «ОВ»(очень высокий)

Используя операции \wedge (min) и \vee (max), получены нечеткие логические уравнения, связывающие функции принадлежности входных и выходных переменных.

Результаты работы системы при варьировании входных параметров представлены в таблице 5.

Таблица 5

Результаты работы нечеткой системы
определения прочностных характеристик металлов

№	$\Delta C/C, \%$	$\Delta H_c/H_c, \%$	$\Delta HB/HB, \%$	$\sigma_B, \text{МПа}$
1	0,2	0,4	0,5	1570
2	0,6	1,2	1,5	1380
3	1,0	2,0	2,5	1260
4	1,4	2,8	3,5	1170
5	1,8	3,6	4,5	975
6	0,2	3,6	4,5	1200
7	1,8	0,4	1,5	1280
8	0,2	0,4	3,5	1350
9	1,5	3,5	4	1130
10	1,5	3,5	1,5	1200

В результате последующих разрывных испытаний исследуемых образцов доказано, что комплексное использование различных методов понижает чувствительность системы к ошибке одного из методов.

Выводы. Разработана модель нечеткой системы определения прочностных характеристик металлов, основанная на комплексном использовании сети Байеса и системы нечеткого логического вывода. Разработана база данных, на основании которой определяется структура взаимосвязей сети Байеса и априорное вычисление вероятностей значений взаимодействующих факторов. Получены вероятностные характеристики определяющих факторов, позволяющие предсказать характер влияния каждого фактора. Рассчитаны коэффициенты чувствительности соответствующего метода, которые использовались для корректировки области определения функций принадлежности в системе нечеткого логического вывода при определении прочностных характеристик металлов. Доказано, что комплексное использование различных методов понижает чувствительность системы к ошибке одного из методов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпаш М.О., Кісіль І.С., Карпаш О.М., Молодецький І.А. Застосування комплексного підходу до визначення фізико-механічних характеристик нафтогазового обладнання // Техніческая діагностика и неразрушающий контроль.- 2006.- №2.- С. 49 – 52.

2. Варфоломеев А.Ю., Микулович А.В., Микулович В.И., Шнитко В.Т. Автоматизированная система диагностики промышленного оборудования // Техническая диагностика и неразрушающий контроль.- 2006.- №4.- С. 8 – 14.
3. Бабичев С.А. Разработка автоматизированной системы технической диагностики прочностных характеристик металлов // Вестник Херсонского государственного технического университета.- 2003.- №18.- С. 154–162.
4. Бабичев С.А., Литвиненко В.И., Шарко А.В. Автоматизированная система технической диагностики прочностных характеристик металлов на основе гибридных нейронных сетей // Техническая диагностика и неразрушающий контроль.- 2004.- №4.- С. 5 – 10.
5. Лебедев А.А., Левитан Л.Я., Шарко А.В. Оценка влияния химического состава на результаты измерений механических свойств стали 40Х акустическим методом // М.: Дефектоскопия.- 1979.- №3.- С. 107-109.