

УДК 519:658.562

С.С. Федин, Н.А. Зубречкая

Киевский национальный университет технологий и дизайна, Киев

## МНОГОФАКТОРНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

На основе установления зависимости между геометрическими характеристиками сварных точечных соединений и технологическими режимами их изготовления разработана многофакторная модель нейросетевого прогнозирования качества технологического процесса изготовления неразъемных соединений.

**Ключевые слова:** многофакторное прогнозирование, нейросетевая модель, качество неразъемных соединений, геометрические характеристики, технологические режимы.

### Введение

Актуальной проблемой машиностроения является обеспечение качества неразъемных соединений. Определяющими факторами качества, влияющими на разброс физико-механических характеристик неразъемных соединений, являются технологические режимы их изготовления [1 – 3]. Применение статистических методов позволяет количественно оценить эти характеристики и уменьшить неопределенность выбора оптимальных параметров технологических режимов изготовления соединений [4]. Так для прогнозирования разброса характеристик сварных соединений широко применяются методы, основанные на идентификации закона распределения и определении его параметров [3]. Однако использование этих методов не позволяет решить задачу повышения эффективности управления многофакторным процессом изготовления сварных соединений и прогнозирования их физико-механических характеристик в зависимости от совокупности изменяющихся технологических режимов.

Решение этой задачи возможно на основе применения нейросетевого моделирования, позволяющего выполнять многофакторное прогнозирование качества соединений при неизвестных зависимостях между входными и выходными массивами данных [5, 6].

**Цель исследования.** Целью статьи является разработка модели многофакторного нейросетевого прогнозирования качества сварных соединений в зависимости от совокупности изменяющихся технологических режимов.

### Оценка разброса геометрических характеристик сварных точечных соединений

Известно, что разброс геометрических характеристик неразъемных соединений описывается моделями нормального, логарифмически нормального и

гамма- распределения в зависимости от технологических режимов изготовления соединений [3, 4].

Проверка распределения характеристик опытных сварных точечных соединений по критерию  $\chi^2$  показала его соответствие нормальному распределению. Технологические режимы изготовления опытных соединений и средние арифметические значения геометрических характеристик (диаметра сварного ядра, величины проплавления и вмятины ядра) приведены в табл. 1, 2 соответственно [3]. Для сравнения разброса геометрических характеристик соединений использовали коэффициент вариации (табл. 2), так как этот статистический показатель позволяет проводить сравнительную оценку разбросов данных с существенными различиями между значениями их средних арифметических [7].

### Разработка модели нейронной сети для прогнозирования качества сварных точечных соединений

При разработке нейросетевой модели в качестве входов  $n$  обучающей выборки выбирали восемь параметров технологических режимов ( $X_1 - X_8$  см. табл. 1), а в качестве выходов –  $t$  шесть параметров геометрических характеристик соединений ( $Y_1 - Y_6$  см. табл. 2).

Обучающая выборка объемом  $N=15$  была составлена из строк (фактов) табл. 1 и табл. 2, а факты 16 – 18 использовались для проведения симуляционного прогнозирования в системе моделирования BrainMaker Professional и оценки качества полученного результата с допуском ошибки обучения модели нейронной сети  $Tol=0,05$ .

Количество нейронов скрытого слоя модели определялось по формуле, являющейся следствием теорем Арнольда-Колмогорова-Хехт-Нильсена [8]:

$$P = \frac{W}{n + t}, \quad (1)$$

где  $n$  – размерность входного сигнала,

Таблица 1

## Технологические режимы изготовления сварных точечных соединений

№ выборки	Толщина материала, мм		Радиус сферы электродов, мм		Продолжительность импульса, с	Амплитуда, кА	Усилия сжатия электродов, кН	
	верхнего	нижнего	верхнего	нижнего			сварочное	ковочное
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$			$X_7$	$X_8$
1	0,8	0,8	50	50	0,04	32	4	3,5
2	1,0	0,8	75	50	0,04	32	3	4,2
3	0,8	1,0	50	75	0,04	32	5	3,5
4	1,0	2,0	75	100	0,06	40	5	5,0
5	1,0	1,2	75	100	0,06	40	4	6,0
6	1,0	1,2	75	75	0,06	40	4	4,0
7	1,2	1,2	100	75	0,06	45	5	7,0
8	1,2	1,2	100	75	0,06	45	6	8,0
9	1,5	1,2	100	75	0,06	47	6	8,0
10	1,2	2,0	75	100	0,06	47	6	8,0
11	1,0	1,2	75	75	0,08	40	5	6,0
12	1,5	1,5	100	100	0,08	47	5	9,0
13	1,8	1,5	100	75	0,06	47	6	9,0
14	1,8	1,2	100	75	0,06	40	5	8,0
15	1,2	1,2	100	75	0,06	40	4	6,0
16	1,2	1,6	100	100	0,06	45	5	8,0
17	1,2	1,3	100	100	0,06	50	5	7,0
18	1,8	1,6	100	100	0,08	47	6	9,0

Таблица 2

## Геометрические характеристики сварных точечных соединений

№ выборки (объем выборки, шт)	Диаметр ядра $d_j$		Проплавление $A_{II}$		Вмятина $B$	
	$\bar{x}_{d_j}$ , мм	$\bar{\sigma}/\bar{x}_{d_j}$ , %	$\bar{x}_{A_{II}}$ , %	$\bar{\sigma}/\bar{x}_{A_{II}}$ , %	$\bar{x}_B$ , %	$\bar{\sigma}/\bar{x}_B$ , %
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$
1 (500)	4,13	5,50	49,50	11,30	9,95	0,60
2 (570)	4,37	6,50	50,08	8,40	9,30	0,52
3 (560)	4,20	6,20	49,00	8,90	9,67	0,52
4 (560)	4,35	4,73	48,80	9,60	9,29	0,47
5 (560)	4,59	6,50	49,97	5,80	9,34	0,50
6 (580)	4,69	6,20	50,99	6,40	9,41	0,49
7 (550)	5,55	4,30	54,90	6,90	9,55	0,55
8 (560)	5,90	4,10	53,60	6,46	9,71	0,49
9 (590)	5,49	5,20	53,40	6,90	9,42	0,57
10 (500)	5,29	3,90	51,75	7,90	9,49	0,54
11 (540)	4,64	6,49	50,52	6,20	9,40	0,50
12 (550)	6,35	3,10	56,46	7,10	9,53	1,45
13 (550)	6,29	3,62	57,06	9,07	9,64	1,32
14 (550)	5,40	4,30	52,69	6,80	9,42	1,52
15 (560)	4,67	4,96	53,46	9,90	9,63	0,58
16 (570)	5,20	3,76	52,97	5,47	9,56	0,50
17 (560)	5,62	3,62	52,48	5,25	9,60	0,49
18 (560)	6,25	3,03	56,45	11,50	9,71	2,06

t – размерность выходного сигнала, W – необходимое число синаптических весовых коэффициентов нейронной сети:

$$\frac{tN}{1 + \log_2(N)} \leq W \leq t \left( \frac{N}{n} + 1 \right) (n + t + 1) + t, \quad (2)$$

где N – объем (число фактов) обучающей выборки нейронной сети.

Использование формул (1) и (2) позволило определить минимальное и максимальное число нейронов скрытого слоя: P<sub>min</sub>=1, P<sub>max</sub>=19. Число нейронов скрытого слоя выбрано равным 10, что соответствует среднему арифметическому значению числа нейронов скрытого слоя в диапазоне [1;19].

Таким образом, разработана модель прямой нейронной сети с архитектурой 8:10:6, включающая 8 входов, 10 нейронов скрытого слоя и 6 нейронов выходного слоя. На рис. 1 представлен интерфейс модели нейронной сети в системе BrainMaker Professional и статистики ее обучения в виде гистограммы распределения ошибок обучения в диапазоне от 0,00 до 0,05%, а также в виде графика непрерывного изменения абсолютного значения ошибки в процессе обучения модели.

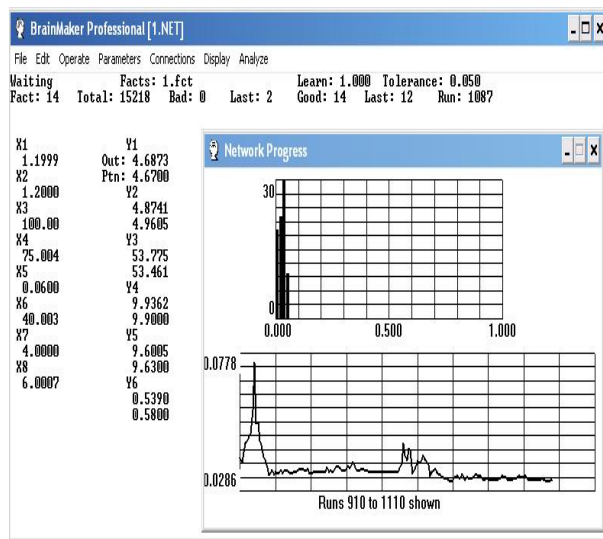


Рис. 1. Интерфейс модели нейронной сети и статистики ее обучения в системе BrainMaker Professional

Графики изменения среднеквадратической RMS-ошибки обучения, представленные на рис. 2, показывают сходимость процесса обучения до установленного значения допуска Tol=0,05.

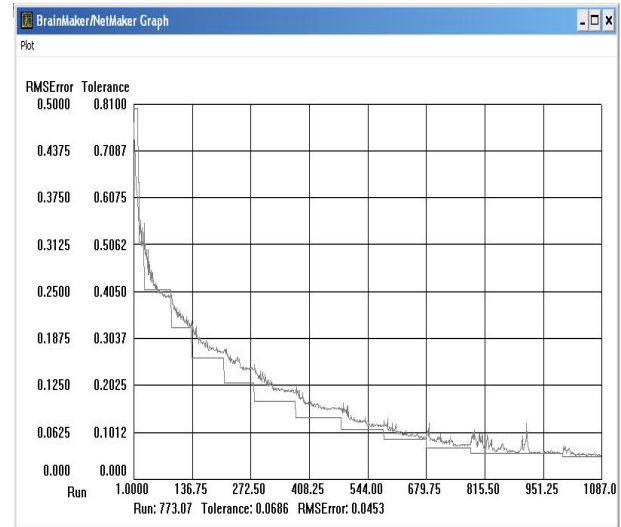


Рис. 2. Изменение RMS-ошибки обучения модели нейронной сети

### Оценка точности прогнозирования и обсуждение полученных результатов

Оценка точности симуляционного прогнозирования осуществлялась по критерию RMS-ошибки:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{P_i} - Y_{N_i})^2}{n}}, \quad (3)$$

где Y<sub>P</sub> – прогнозное значение исследуемой характеристики, Y<sub>N</sub> – номинальное значение исследуемой характеристики; n – число значений прогнозируемых характеристик.

Анализ результатов симуляционного прогнозирования (табл. 3) показал, что полученная модель двухслойной нейронной сети с архитектурой 8:10:6 позволяет с точностью 98% – 99% установить взаимосвязи между входами (параметрами технологических режимов изготовления неразъемных сварных точечных соединений) и выходами нейронной сети (геометрическими характеристиками соединений).

Таблица 3

Результаты симуляционного прогнозирования

Выход нейросети	Факт 16		Факт 17		Факт 18	
	Y <sub>P</sub>	Y <sub>N</sub>	Y <sub>P</sub>	Y <sub>N</sub>	Y <sub>P</sub>	Y <sub>N</sub>
Y1	5,72	5,20	5,62	5,62	6,23	6,25
Y2	3,69	3,76	4,72	3,62	3,35	3,03
Y3	54,35	52,97	53,76	52,48	55,91	56,45
Y4	6,66	5,47	6,40	5,25	6,72	11,50
Y5	9,61	9,56	9,40	9,60	9,42	9,71
Y6	0,55	0,50	0,49	0,49	1,47	2,06
RMS-ошибка	0,78		0,84		1,98	

Используя разработанную нейросетевую модель, можно моделировать различные варианты зависимостей между параметрами технологических режимов изготовления неразъемных сварных точечных соединений и их геометрическими характеристиками. Так, например, получен прогноз для выборки исходных данных, в которой значения входов  $X_1 - X_4$  и  $X_5 - X_8$  относятся к факту №6 (выборка №6 см. табл. 1) и факту №12 (выборка №12 см. табл. 1) соответственно.

Результат прогнозирования в системе BrainMaker Professional для моделируемой выборки исходных данных представлен на рис. 3.

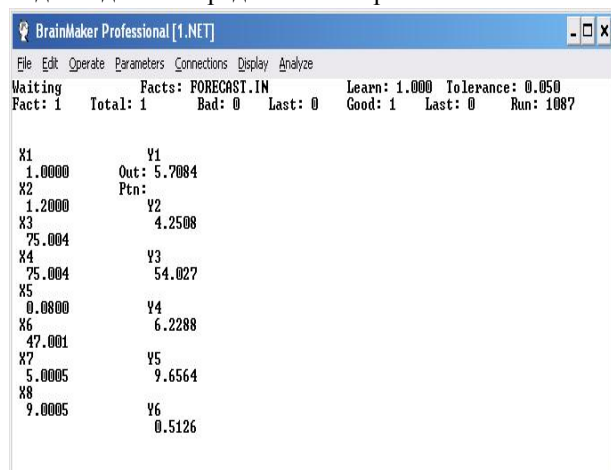


Рис. 3. Результат прогнозирования в системе BrainMaker Professional

Используя прогнозные значения выходов  $Y_2, Y_4, Y_6$ , характеризующих коэффициенты вариации диаметра сварного ядра, величины проплавления и вмятины ядра, рассчитаны оценки соответствующих значений стандартных отклонений этих геометрических характеристик сварных точечных соединений:  $\sigma_2=0,24\text{мм}$ ,  $\sigma_4=3,37\%$ ,  $\sigma_6=0,05\%$ .

Для моделируемой выборки исходных данных по результатам прогноза (см. рис. 3) и рассчитанным стандартным отклонениям получены математические модели, описывающие разброс геометрических характеристик сварных точечных соединений для диаметра ядра, проплавления и вмятины:

$$p(d_{\text{я}}) = \frac{1}{0,24\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{d_{\text{я}} - 5,71}{0,24}\right)^2\right]; \quad (4)$$

$$p(A_{\text{п}}) = \frac{1}{3,37\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{A_{\text{п}} - 54,03}{3,37}\right)^2\right]; \quad (5)$$

$$p(B) = \frac{1}{0,05\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{B - 9,66}{0,05}\right)^2\right]. \quad (6)$$

На основе полученных зависимостей (4) – (6) в системе математического моделирования MathCAD в доверительном интервале  $P=99,99\%$  построены

графики плотности нормального распределения и соответствующие гистограммы распределения прогнозных значений геометрических характеристик сварных точечных неразъемных соединений для выборки объемом 550 (рис. 4 – 6).

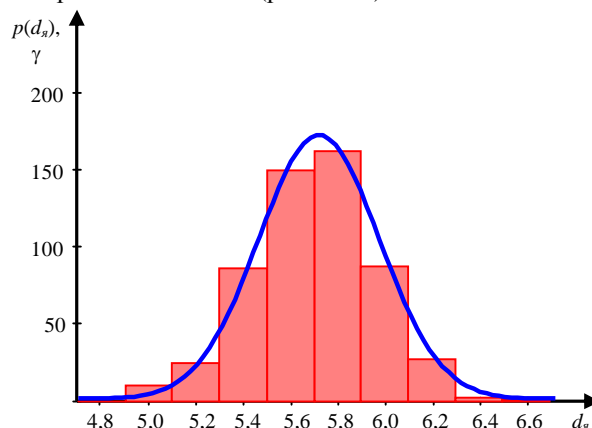


Рис. 4. Плотность нормального распределения и гистограмма распределения прогнозных значений диаметра ядра<sup>1</sup>

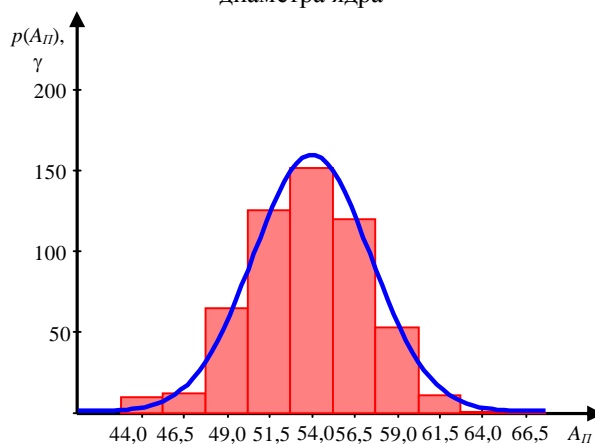


Рис. 5. Плотность нормального распределения и гистограмма распределения прогнозных значений величины проплавления

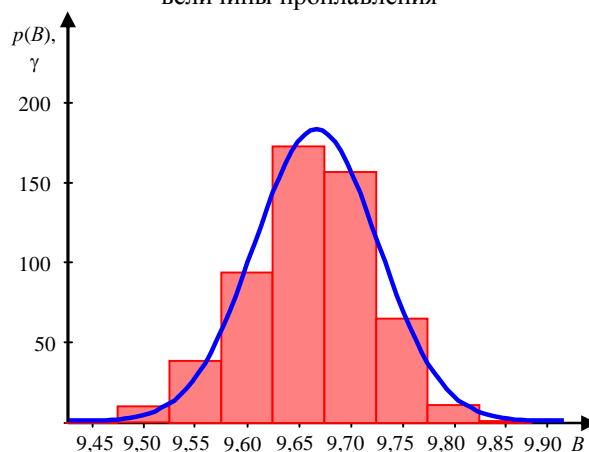


Рис.6. Плотность нормального распределения и гистограмма распределения прогнозных значений вмятины ядра

<sup>1</sup>  $\gamma$  – моделируемые частоты попадания значений диаметра ядра в каждый из интервалов гистограммы

Таким образом, зная допусковые значения различных физико-механических характеристик неразъемных соединений с использованием прогнозной информации можно решать задачи выборочного статистического контроля и управлять качеством технологического процесса изготовления неразъемных соединений в условиях апостериорной статистической определенности.

Предложенный нейросетевой подход является универсальным и может быть применен для моделирования многофакторных зависимостей между технологическими параметрами изготовления неразъемных соединений и их физико-механическими характеристиками с целью повышения эффективности управления качеством технологических процессов изготовления неразъемных соединений изделий машиностроения и приборостроения.

### Выводы

1. Разработана многофакторная модель прямой нейронной сети для прогнозирования качества изготовления неразъемных соединений на основе установления зависимости между геометрическими характеристиками сварных точечных соединений и технологическими режимами их изготовления. Точность результатов прогнозирования составила 98% – 99%.

2. Использование результатов прогнозирования позволяет повысить эффективность управления качеством технологического процесса изготовления неразъемных соединений за счет получения прогнозной информации о геометрических характеристиках соединений при изменении совокупности технологических режимов их изготовления.

### Список литературы

1. Дербишер А.В. Технологические методы управления качеством продукции / А.В. Дербишер. – М.: Госстандарт, 1971. – 344 с.
2. Навроцкий Д.И. Расчет сварных соединений с учетом концентрации напряжений / Д.И. Навроцкий. – М.: Машиностроение, 1968. – 271 с.
3. Бурмистров В.П. Обеспечение качества неразъемных соединений и полуфабрикатов / В.П. Бурмистров. – Л.: Машиностроение, 1985. – 223 с.
4. Исаев И.Е. Статистическая оценка качества сварных соединений / И.Е. Исаев // Надежность и контроль качества. – 1973. – №3. – С. 17-19.
5. Круглов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с.
6. Куравский Л.С. Нейронные сети в задачах прогнозирования, диагностики и анализа данных: [учеб. пособие] / Л.С. Куравский, С.Н. Баранов, С.Б. Малых. – М.: РУСАВИА, 2003. – 100 с.
7. Петрунин Ю.Ю. Информационные технологии анализа данных. Data analysis: [учеб. пособие]; 2-е издание / Ю.Ю. Петрунин. – М.: КДУ, 2010. – 292 с.
8. Ясницкий Л.Н. Введение в искусственный интеллект: [учеб. пособие] / Л.Н. Ясницкий. – М.: Академия, 2005. – 176 с.

Поступила в редколлегию 13.09.2011

Рецензент: д-р. техн. наук, проф. Н.А. Зенкин, Киевский национальный университет технологий и дизайна, Киев.

### БАГАТОФАКТОРНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ НЕРОЗ'ЄМНИХ З'ЄДНАНЬ

С.С. Федін, Н.А. Зубрецька

На основі встановлення залежності між геометричними характеристиками зварних точкових з'єднань і технологічними режимами їх виготовлення розроблена багатofакторна модель нейромережного прогнозування якості технологічного процесу виготовлення нероз'ємних з'єднань.

**Ключові слова:** багатofакторне прогнозування, нейромережна модель, якість нероз'ємних з'єднань, геометричні характеристики, технологічні режими.

### MULTIVARIABLE FORECASTING OF QUALITY OF MAKING OF UNSECTIONAL CONNECTIONS

S.S. Fedin, N.A. Zubreckaya

On the basis of establishment of dependence between geometrical descriptions of the welded point connections and technological modes of their making the multivariable model of neural network forecasting of quality of technological process of making of unsectional connections is developed.

**Keywords:** multivariable forecasting, neural network model, quality of unsectional connections, geometrical descriptions, technological modes.